

**Departamento de ingeniería de sistemas
y automatización**



**Grado en Ingeniería Electrónica y
Automática**

Trabajo Fin de Grado

**Sensado de fuerza en un hilo SMA
a través de la impedancia**

Realizado por: DAVID QUIÑONES SÁNCHEZ.

Tutelado por: LUIS ENRIQUE MORENO LORENTE.

Agradecimientos:

En primer lugar, me gustaría agradecerle a mi tutor, Luis Enrique Moreno Lorente que me brindara la oportunidad de realizar este proyecto, así como por su tiempo y esfuerzo. Mención especial merece su ayudante y doctorando Dorin Sabin, al cual me gustaría agradecerle también todo el tiempo que ha invertido ayudándome, ya que sin su ayuda no habría podido realizarlo.

Quiero darle las gracias a la Universidad Carlos III de Madrid por haberme permitido desarrollarme como persona, así como por permitirme conocer a una serie de personas muy importantes en mi vida, con los cuales he compartido a lo largo de todos estos años miles de experiencias y a los que hoy tengo el orgullo de llamar como mis mejores amigos. A mi pareja, agradecerle todo el apoyo que me ha brindado durante este tiempo, así como el soporte emocional, mental y físico que todo ello ha supuesto.

Por supuesto, quiero darle las gracias desde el fondo de mi corazón a mi familia por haberme apoyado de forma incondicional todos estos años de todas las maneras posibles, ya que sin su ayuda me hubiera resultado imposible realizar este viaje.

Por último, quiero agradecerle a todos los amigos, familiares, compañeros y profesores, que de una forma u otra han contribuido a que aquel niño que entró en la universidad hace ya tanto tiempo sea hoy un hombre.

In memoriam Luna (2001 - 2016).

Resumen:

El SMA es un tipo de material cuya principal característica es la de recuperar su forma original, aun habiendo plastificado conforme se le aplica calor al mismo. Normalmente se precisa de un detector de posición para saber cómo se mueve. En este proyecto se busca establecer una relación entre la impedancia resultante de hacer circular una corriente por un hilo de este material y la posición del mismo, que permita eliminar el detector de posición.

Abstract:

The SMA is a kind of material whose main feature is to recover it's original size even have gone through plastification. Usually it is often needed a position detector just to know how is moving. The goal of this proyect is stablsh a relationship between the impedance resulted of making flow a current through a SMA thread and the position of this material, that brings us the possibility to erase the position detector.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Estado del arte.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Estructura de la memoria.....	3
1.5. Marco regulador.....	3
2. LA TECNOLOGÍA SMA	4
2.1. Introducción a los SMA.....	5
2.2. Origen e historia.....	7
2.3. Descripción de un SMA.....	8
2.4. Diagrama de fases del nitinol (Ni – Ti).....	9
2.5. Transformaciones de estado.....	10
2.5.1 Mediante difusión.....	10
2.5.2 Mediante desplazamiento.....	10
2.5.3 La transformación martensítica.....	11
2.5.4 Energía de activación del SMA.....	11
2.5.5 Calentamiento.....	12
2.5.6 Enfriamiento.....	12
2.6. Las propiedades de los SMAs.....	13
2.6.1 Propiedad de la memoria.....	13
2.6.2 Superelasticidad.....	15
2.6.3 Doble efecto memoria.....	16
2.7. Carga en el SMA.....	18
2.8. Aplicaciones de los SMA.....	19
2.9. Ventajas e inconvenientes.....	20
3. DESCRIPCIÓN DE LOS MEDIOS EMPLEADOS	21
3.1. Banco de trabajo.....	22
3.2. Hilo de nitinol.....	23
3.3. Discos de pesas.....	23
3.4. Elementos Hardware.....	24
3.4.1 Tarjeta STM32F4 Discovery.....	24
3.4.2 Etapa de potencia.....	25
3.4.3 Fuente de alimentación.....	25
3.4.4 Sensores.....	26
4. SENSADO.....	28
4.1. Software.....	29
4.2. Target.....	29
4.2.1 Variables.....	30
4.2.2 Entrada de datos en la tarjeta.....	31
4.2.3 Lectura del sensor.....	33
4.3. Host.....	37
5. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS Y RESULTADOS.....	41
5.1. Calentamiento.....	42
5.1.2 Toolbox system identification.....	42
5.1.3 Estimación mediante promediado de puntos.....	47
5.2. Enfriamiento.....	50

6.1. Conclusiones.....	55
6.2. Trabajos futuros.....	55
7.1 Presupuesto.....	58
7.2. Entorno socioeconómico.....	59
8. BIBLIOGRAFÍA	60

Índice de tablas

TABLA 1: DESGLOSE DEL PRESUPUESTO ESTIMADO.....	58
---	----

Índice de figuras

Figura 1 : Gráfica genérica Tensión-Deformación.....	5
Figura 2: Gráfico de los materiales SMA.	6
Figura 3: Temperaturas propias de un SMA.....	8
Figura 4: Diagrama de fase de una aleación Ni-Ti.....	9
Figura 5: Ciclo de transformación de martensita y austenita.	10
Figura 6: Histéresis en los SMA.	11
Figura 7: Diferencia de flujo de calor en un SMA.....	12
Figura 8: Proceso del efecto memoria por transformación.	13
Figura 9: Proceso del efecto memoria por reorientación.	14
Figura 10: Diagrama del efecto memoria por reorientación.	14
Figura 11: Gráfica del efecto superelástico por transformación.	15
Figura 12: Gráfica del efecto superelástico por reorientación.	16
Figura 13: Gráfica del entrenamiento de un SMA mediante sobredeformación.	17
Figura 14: Gráfica de entrenamiento de un SMA mediante ciclo pseudoelástico.....	17
Figura 15: Efecto de la carga en la histéresis.	18
Figura 16: Aplicación de un SMA en un vaso cardiovascular.	19
Figura 17: Aplicación de un SMA como aparato dental.....	20
Figura 18: Banco de trabajo.	22
Figura 19: Hilo de nitinol.	23
Figura 20: Pesas de 1000 gramos y 500 gramos.	23
Figura 21: Tarjeta de adquisición Discovery STM32F407VG.....	24
Figura 22: Tarjeta de electrónica de potencia.	25
Figura 23: Fuente de alimentación de Aim-TTi.	25
Figura 24: Sensor de posición NSE-5310.....	26
Figura 25: Sensor de corriente Allegro ACS 722.....	27
Figura 26: Vista general de la interfaz del Target.	29
Figura 27: Variables del programa.	30
Figura 28: Especificaciones del microcontrolador	30
Figura 29: Diagrama de bloques de las ramas de calentamiento y enfriamiento	31
Figura 30: Rama de calentamiento.	31
Figura 31: Rama de enfriamiento.....	32
Figura 32: Bloques usados para la lectura del sensor.	33
Figura 33: Ley de Ohm para hallar la impedancia.....	33
Figura 34: Vista general del bloque RAW Sensor Read Out.....	34
Figura 35: Bloques usados para comunicarse con la tarjeta.....	34
Figura 36: Parte del bloque RAW Sensor Read out dedicada a la programación del imán.	35
Figura 37: Esquema del funcionamiento del imán multipolar.....	35
Figura 38: Código de la programación del imán multipolar.....	36
Figura 39: Vista general de la interfaz del Host.	37
Figura 40: Almacenamiento de las 3 señales en variables.....	38
Figura 41: Bloques que muestran en tiempo real la posición, la corriente y la impedancia.....	38
Figura 42: Gráficas mostrando un ensayo completo de las 3 señales.	38
Figura 43: Bloques encargados de controlar el flujo de corriente y mostrar el tiempo de ensayo.	39

Figura 44: Código que controla el flujo de corriente.	39
Figura 45: Gráficas mostrando la frontera entre las fases de calentamiento y enfriamiento de las 3 señales.	40
Figura 46: Vista general de la interfaz del Toolbox system identification.	42
Figura 47: Código encargado de pasar al formato de la aplicación.	43
Figura 48: Introducción de datos en la aplicación.	43
Figura 49: Gráficas mostrando la comparativa entre dos ensayos en fase de calentamiento. ..	44
Figura 50: Gráfica comparando las aproximaciones entre dos modelos.	44
Figura 51: Diagrama de bloques usado para la visualización de la respuesta del modelo.	45
Figura 52: Gráfica mostrando respuesta fallida al modelo creado 1.	46
Figura 53: Gráfica mostrando respuesta fallida al modelo creado 2.	46
Figura 54: Muestreado a 125 milisegundos de ensayo completo y fase de calentamiento en la impedancia.	47
Figura 55: Muestreado a 125 milisegundos de ensayo completo y fase de calentamiento en la posición.	48
Figura 56: Comparación de 7 ensayos entre zonas de posición y promedio de impedancias en la fase de calentamiento.	48
Figura 57: Código perteneciente a la introducción de datos en Matlab para su posterior graficado.	49
Figura 58 : Comparación entre gráfica obtenida por el método del promediado de puntos y una de posición cualquiera en fase de calentamiento.	49
Figura 59: Gráfica mostrando tanto la fase de calentamiento como la de enfriamiento.	50
Figura 60: Código utilizado para la creación del average filter.	51
Figura 61: Gráfica mostrando el filtrado del ruido.	51
Figura 62: Gráfica perteneciente a un ensayo casi completo de la señal de posición.	52
Figura 63: Comparación entre zonas de posición y promedio de impedancias para la fase de enfriamiento.	52
Figura 64: Código perteneciente a la introducción de datos para su posterior graficado en fase de enfriamiento.	53
Figura 65: Comparación entre gráfica obtenida mediante promediado de puntos y una de posición cualquiera en fase de enfriamiento.	53

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción.

A lo largo de la historia, el ser humano se ha servido de los materiales que le rodeaban para conseguir un cierto beneficio; ya sea desde las primeras herramientas para cazar hechas de sílex, hasta las baterías de *grafito* en la actualidad. Es decir, la evolución de una civilización ha estado siempre intrínsecamente relacionada con el progreso de la tecnología de la que dispone. Es en este contexto en el que se enmarca el objeto de estudio a tratar: los materiales SMA.

El interés que suscitan este tipo de materiales radica en su característica más peculiar: tienen memoria, es decir, al calentarse se deforman, encogiéndose por regla general, y al enfriarse la vuelven a recuperar poco a poco. Es por ello que son conocidos como “músculos artificiales”, siendo por tanto especialmente interesante aplicar sus propiedades al mundo de la biomedicina o la robótica. Más adelante se explicarán en profundidad todas y cada una de sus particularidades, así como las distintas aplicaciones que tienen en los diferentes ámbitos del mundo de la ingeniería.

El presente proyecto se ha realizado como trabajo de fin de grado por David Quiñones Sánchez y ha sido dirigido por el catedrático y doctor, Luis Enrique Moreno Lorente en la Universidad Carlos III de Madrid.

1.2. Estado del arte.

Los materiales SMA son una serie de aleaciones cuya propiedad principal es la capacidad de recobrar su forma original incluso habiendo plastificado, es por ello que son un objeto de estudio recurrente debido a todas las posibles aplicaciones en las que se pueden utilizar.

El objetivo de este proyecto es optimizar su funcionamiento, intentando encontrar para ello una relación entre la impedancia y la posición que permita eliminar el sensor que se ha utilizado para medir. En la actualidad, la gran mayoría de los ensayos o estudios versan sobre las aplicaciones más inmediatas que pueden desempeñar este tipo de materiales. Por ello, se pueden encontrar estudios que traten por ejemplo el campo de la cirugía con un actuador que usa hilos SMA basado en la impedancia de los mismos, o numerosos proyectos que aborden el control y medición de la posición del hilo usando diferentes tipos de sensores, pero en concreto el campo de la optimización no está tan ampliamente estudiado.

1.3. Objetivos.

El objetivo principal de este proyecto ha sido el de intentar establecer una relación entre la impedancia resultante de circular una corriente por el hilo de SMA y la diferencia de posición del material (deformación) tal, que permitiese eliminar el detector de posición tanto en la fase de calentamiento como en la de enfriamiento.

A lo largo del proceso de estudio se han ido alcanzando una serie de objetivos secundarios como son:

- Obtener un mayor conocimiento sobre los materiales SMA.
- Montaje y conexionado de los distintos elementos.
- Diseño y programación en *Matlab* y *Simulink* de los diagramas de bloques e interfaces necesarias para el sensado del hilo de SMA.

1.4. Estructura de la memoria.

Capítulo 1: Introducción y objetivos.

Capítulo 2: Descripción de la tecnología SMA.

Capítulo 3: Descripción de los medios empleados.

Capítulo 4: Sensado.

Capítulo 5: Análisis de resultados.

Capítulo 6: Conclusiones y futuros trabajos.

Capítulo 7: Presupuesto y entorno socioeconómico.

Capítulo 8: Bibliografía.

1.5. Marco regulador.

Dado que ni durante la realización del proyecto ni en las posibles aplicaciones que este pudiera tener en la sociedad, no se han empleado ni se emplearán medios o elementos calificados de potencialmente peligrosos, sino que simplemente se han usado o se usarían equipos conectados a la red eléctrica, la legislación aplicable se enmarcará dentro de los procedimientos relacionados con la red eléctrica.

En concreto, la legislación aplicable es “EL REAL DECRETO 614/2001” sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico, así como el artículo “30.2 de la Ley 24/2013” en las que el operador asume la responsabilidad del sistema eléctrico velando por su correcta gestión y funcionamiento [1].

2. LA TECNOLOGÍA SMA

2.1. Introducción a los SMA.

Los materiales SMA o *Shape Memory Alloy* en inglés, son una serie de aleaciones cuya propiedad más particular es la de tener memoria, es decir, bajo determinadas circunstancias son capaces de recuperar su forma inicial. Antes de entrar más en detalle con el resto de propiedades de las que disponen, se procederá a explicar mejor esta característica tan singular mediante un ejemplo con un objeto que se encuentra en la vida cotidiana.

Las gomas elásticas, como bien indica su propio nombre, tienen la propiedad de estirarse y contraerse, dentro de unos márgenes conocidos como zona elástica, es decir, siempre y cuando no se superen esos límites, la goma en cuestión podrá recuperar su forma original sin ningún tipo de problema. Ahora bien, cuando se supera esa frontera y se fuerza la goma hasta unas nuevas cotas, el objeto entra dentro de la llamada zona plástica, en la cual ya no conserva la propiedad de volver a adoptar su forma original.

En función de la cantidad de energía utilizada en el proceso, la goma quedará más o menos deformada, pero como ya se ha comentado, nunca recuperará la forma original. En caso de que la cantidad de energía fuera excesiva, es decir, más de lo que la goma puede soportar, ésta entraría en la zona de rotura acabando por romperse.

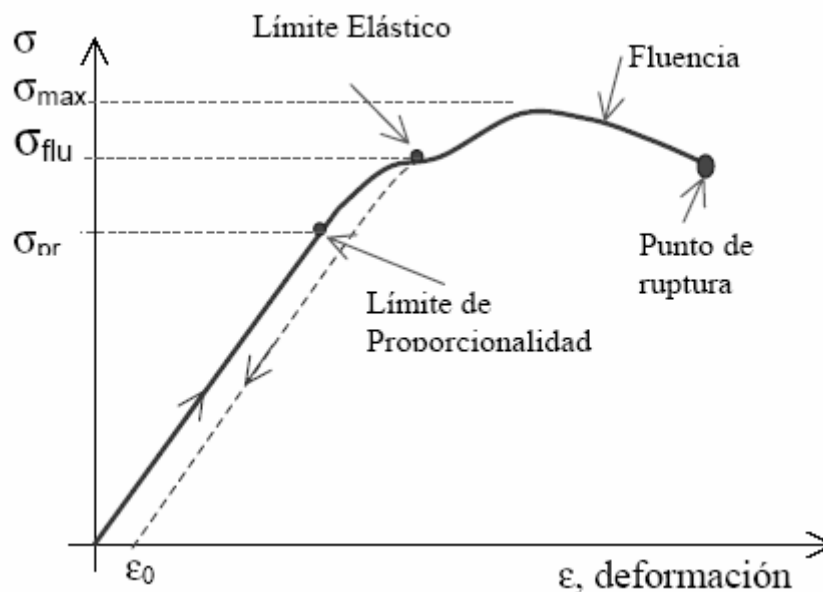


Figura 1 : Gráfica genérica Tensión-Deformación [2].

Continuando con el ejemplo de la goma elástica queda patente que uno de los principales inconvenientes de este tipo de objetos es que una vez pasada la barrera de la zona elástica pierden su característica más importante. Pues bien, volviendo al objeto de estudio, los SMA, la característica que los hace tan interesantes es que aun habiendo

sobrepasado la zona elástica son capaces de recuperar su forma original si se les aplica calor. En función de la cantidad de energía y la forma en la que ésta sea suministrada, estas aleaciones recuperarán su estado de una forma más lenta o rápida.

Es por ello que a los SMAs se les conoce también como músculos artificiales, ya que la aplicación más común que suelen tener es la de ejercer una fuerza para desplazar, levantar o mover objetos. Son usados especialmente tanto en el mundo de la robótica como en el de la biomedicina, estando enfocados particularmente en este último en el área de las rehabilitaciones de pacientes.

Si bien es cierto que su propiedad les confiere una ventaja respecto a otros materiales elásticos, pudiendo recuperar su forma original incluso en la zona plástica, esto no los convierte en indestructibles, es decir, si se sobrepasa esta zona y se entra en la de rotura, el material acabará por romperse al igual que los otros.

Por otro lado, estos materiales no son los únicos que poseen la propiedad de recordar la forma bajo determinadas circunstancias, forman parte de una familia conocida como “materiales inteligentes”, entre los cuales también se encuentran los SMPs (polímeros que reaccionan ante un cambio térmico), los SMCs (materiales cerámicos que también reaccionan ante un estímulo térmico) y los SMFAs (aleaciones que reaccionan ante variaciones del campo magnético) [3].

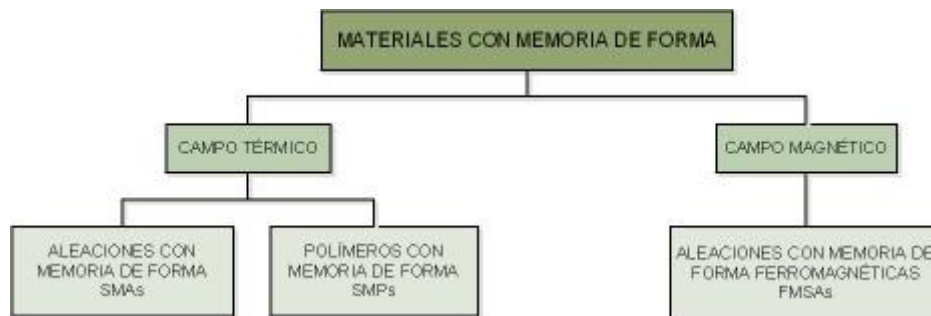


Figura 2: Gráfico de los materiales SMA.

2.2. Origen e historia.

La persona a la que se le atribuyen los primeros pasos en el mundo de los materiales con memoria de forma es el científico sueco *Gustav Arne Olarson*, quien en 1932 observó el efecto superelástico en una aleación de oro y cadmio. Años después fueron *Greninger* y *Moradin* quienes en 1938 descubrieron uno de los fenómenos más característicos asociados a los SMAs: la desaparición de la fase martensítica durante el cambio de temperatura en una aleación de cobre y zinc.

Durante las dos siguientes décadas, este fenómeno tan extraño fue ampliamente investigado y explicado por los científicos *Kurdjumov* y *Khandros*, así como *Chang* y *Read* quienes se valieron del uso de los rayos X para intentar arrojar un poco de luz sobre este hecho. Es en 1962 cuando esta tecnología comienza a adquirir una cierta relevancia al darse cuenta el científico americano *WJ Buehler* que la aleación de nitinol (Níquel y Titanio) con la que estaba trabajando poseía una serie de propiedades mucho más interesantes que las anteriores de oro y cadmio en cuanto a la memoria de forma, convirtiéndose desde este momento el nitinol en la principal aleación estudiada y utilizada. Desgraciadamente y a pesar de las investigaciones tanto industriales como gubernamentales, el desarrollo del nitinol quedó parcialmente estancado durante dos décadas debido a una serie de factores como pudieron ser el alto precio de dicho material y por tanto la falta de suministro del mismo. Es entonces en la década de los 80 cuando ante la ausencia de un material que combinara resistencia a la corrosión, ductilidad y estabilidad vuelve a escena el nitinol, siendo utilizado por primera vez en esta misma década en el mundo de la medicina como implantes en humanos. Fue tal la relevancia que empezó a cobrar que en 1988 tuvo lugar la primera conferencia dedicada específicamente a aplicaciones de las aleaciones con memoria de forma en el aspecto ingenieril.

En 1992 se fundó la SMST (*Shape Memory and Superelastic Technologies*), sociedad dedicada a las aplicaciones de estas aleaciones en la ingeniería. Durante esta década y tras el éxito como implante en humanos, se disparó la demanda de dispositivos más pequeños y menos invasivos, lo que catapultó a la industria del nitinol a cotas jamás alcanzadas, siendo uno de los materiales quirúrgicos más utilizados hoy en día [4].

2.3. Descripción de un SMA.

Se conoce como SMA a una serie de aleaciones (cobre y aluminio, níquel y titanio, etc...) que en determinadas proporciones y bajo determinadas circunstancias le confieren al material una serie de propiedades como la memoria de forma, la superelasticidad o la doble memoria entre otras, que en distintas concentraciones no serían capaces de obtener.

Para activar estas propiedades es necesario someter a estos materiales a una variación de temperatura, lo cual generará un cambio en la microestructura de la aleación, pasando así de martensita a bajas temperaturas a austenita en altas temperaturas (siendo al revés en el caso de enfriamiento). Este cambio de temperatura se puede originar de distintas formas; ya sea mediante el paso de una corriente eléctrica por efecto Joule o simplemente variando la temperatura del medio en el que se encuentra por conducción, convección o radiación [2].

El tipo de aleación usada en este proyecto ha sido un hilo de nitinol (níquel y titanio), haciéndose especial incapié en torno a las propiedades de la martensita y la austenita para este tipo de aleación. Correspondiéndose la siguiente gráfica a la aleación ya mencionada:

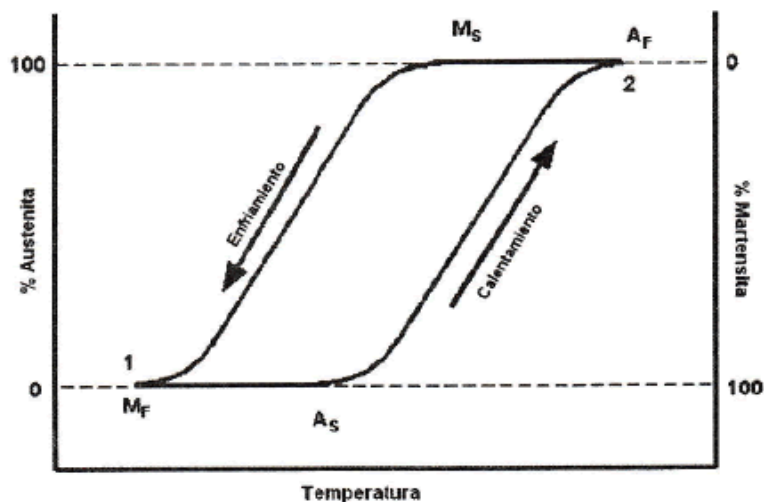


Figura 3: Temperaturas propias de un SMA [6].

M_s : T^a a la cual empieza la transformación de la austenita en martensita, partiendo de un 100% de austenita.

M_f : T^a a la cual acaba la transformación de la austenita en martensita, obteniendo así un 100% de martensita.

A_s : T^a a la cual empieza la transformación de martensita en austenita, partiendo de un 100% de martensita.

A_f : T^a a la cual acaba la transformación de martensita en austenita, obteniendo así un 100% de austenita.

2.4. Diagrama de fases del nitinol (Ni – Ti).

Como ya se ha mencionado anteriormente, para que una aleación sea SMA debe ser de una determinada proporción, o que al menos se encuentre dentro de un cierto rango. En el caso del nitinol, la concentración de níquel y titanio debe encontrarse en torno al 49%-51%, ya que en caso de no respetar este rango se formarían una serie de compuestos distintos propiciandando así la pérdida parcial de las propiedades de los materiales SMA [5].

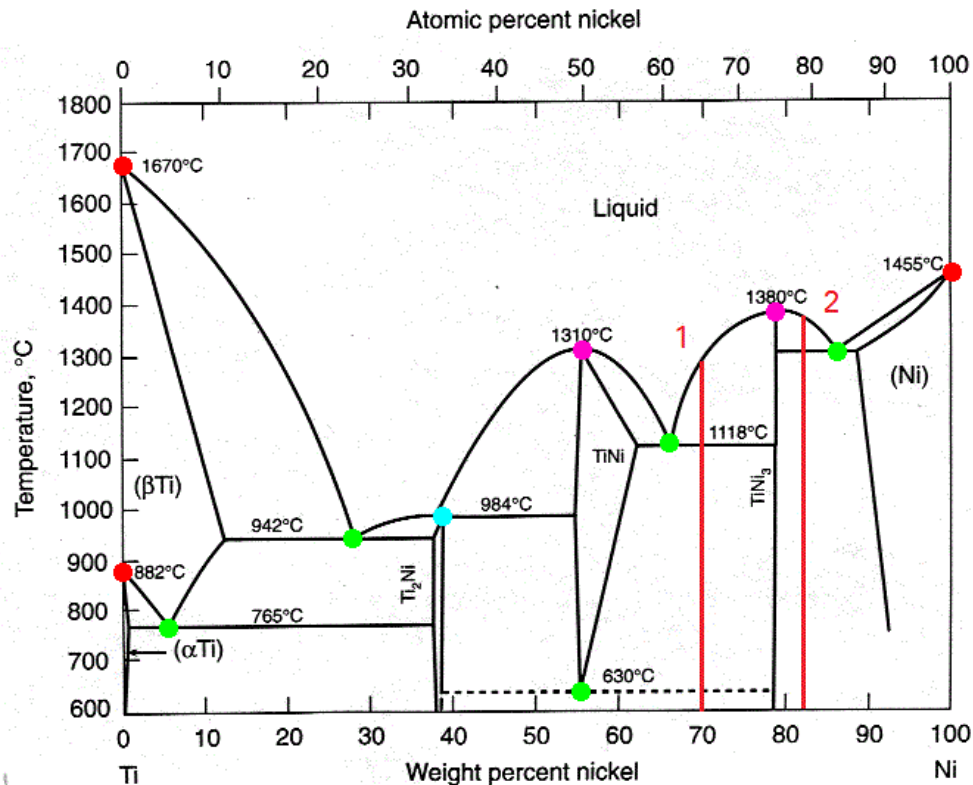


Figura 4: Diagrama de fase de una aleación Ni-Ti [6].

Se habla sobre un rango de concentraciones ya que en función de cuanta cantidad de compuesto haya de un tipo, y cuanto de otro, habrá una variación del cambio de temperatura de la aleación. Pudiéndose construir así materiales que sean capaces de activarse en función de las circunstancias, tanto a temperaturas altas como bajas.

Por ejemplo, en el caso del nitinol, si la concentración de níquel está en torno al 49%, la transformación de austenita a martensita comenzará a temperaturas elevadas (70°C), en cambio, si esta concentración está en torno al 51%, esta misma transformación empezará a bajas temperaturas (-30°C) [5].

2.5. Transformaciones de estado.

Como ya se ha mencionado, el gran responsable de las particulares propiedades de los SMA son los cambios de estado que sufre a nivel estructural, pudiéndose producir éstos mediante dos formas: difusión o desplazamiento.

2.5.1 Mediante difusión.

La difusión es el mecanismo mediante el cual la materia se transporta a través de ella misma generando así cambios en las propiedades del material, como por ejemplo sería el endurecimiento del mismo. Este hecho conlleva la aparición de una segunda fase, consistente en la formación de una serie de granos o nuevos núcleos. Existen dos tipos de difusión; la sustitucional (en la cual los átomos se mueven a posiciones vacías) y la intersticial (en la cual los átomos se sitúan en posiciones existentes de la red cristalina) [2].

2.5.2 Mediante desplazamiento.

La transformación por desplazamiento o martensítica es la más corriente en los SMAs, y consiste en una reordenación de la estructura cristalina del material. Debido a la alta velocidad a la que suceden no se producen difusiones significativas, siendo así el movimiento atómico mucho más reducido que en el otro tipo de transformación.

Una de las características de este tipo de transformación es que en función de la temperatura a la que se encuentre el material se encontrarán diferentes microestructuras, encontrándose así microestructuras de carácter martensítico a bajas temperaturas, y de carácter austenítico a altas, surgiendo las propiedades de los SMAs de las variaciones entre estas microestructuras [2].

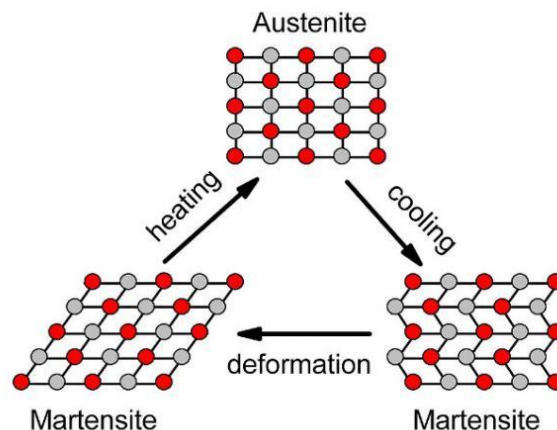


Figura 5: Ciclo de transformación de martensita y austenita [6].

2.5.3 La transformación martensítica.

El principal inconveniente en este tipo de transformación es la histéresis (tendencia de un material a conservar alguna de sus propiedades en ausencia del estímulo que lo ha generado) que lleva asociada, si bien es cierto que la cantidad producida no es siempre la misma, sino que dependerá del tipo de transformación martensítica que sea. Encontrándose así por un lado las transformaciones termoelásticas y las no termoelásticas. En las primeras, que son a las que pertenecen los SMAs, el cambio de volumen que se produce es pequeño, siendo por tanto así también la histéresis que se genera. En cambio, en las no termoelásticas el cambio de volumen existente es mucho más grande por lo que lleva asociada también una mayor histéresis [3].

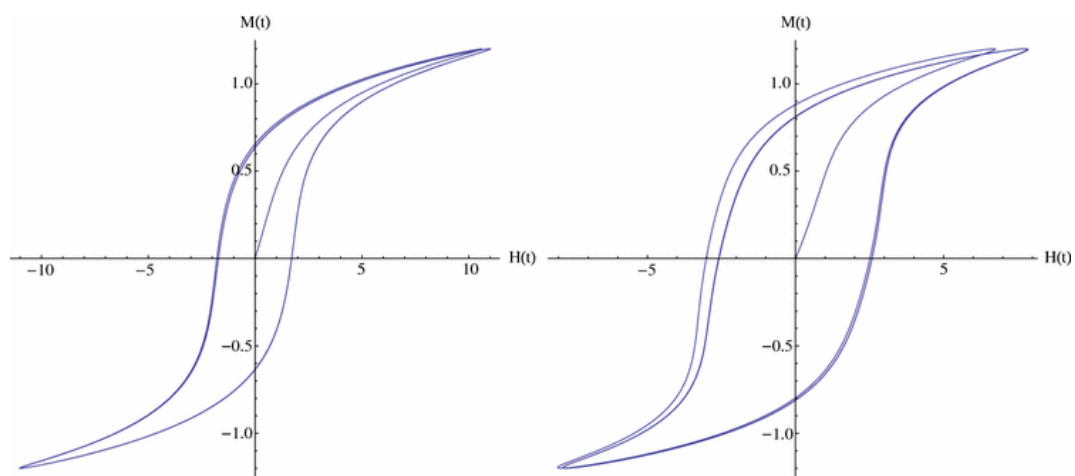


Figura 6: Histéresis en los SMA.

2.5.4 Energía de activación del SMA.

Como ya se mencionó previamente, el SMA precisa de un aporte de energía externo para activar sus propiedades. Ese aporte podría provenir del calentamiento del material al pasar una corriente por el Efecto Joule, o de forma totalmente externa mediante conducción, convección o radiación. En este último caso, de no estar el material convenientemente aislado se generarán pérdidas de energía a lo largo del material en los casos de radiación y convección, así como en la junta o unión de los materiales en la conducción.

Para conocer cómo es el flujo y la forma en el material se utilizan calorímetros diferenciales, a través de los cuales se observa una reacción endotérmica en la transformación de martensita a austenita, así como una reacción exotérmica de austenita a martensita [3]. Diferenciándose dos procesos por tanto:

2.5.5 Calentamiento.

Durante este proceso se aumentará la temperatura del material SMA hasta alcanzar A_s , punto a partir del cual las propiedades empiezan a cambiar, precisando de más flujo de calor para continuar con el proceso. Se puede observar que al tener que incrementar el flujo de calor también aumenta la capacidad calorífica del material. Éste proceso continúa hasta la mitad de la transformación, punto a partir del cual ya empieza a disminuir ya que la mayor parte de la martensita se ha transformado. Al final del proceso se comprueba que la variación de flujo acaba por ser continuo, indicio de que la transformación ha acabado y que por tanto la capacidad calorífica del SMA es constante [3].

2.5.6 Enfriamiento.

El procedimiento seguido es parecido al del proceso de calentamiento, solo que al alcanzar el punto M_s , el SMA irá liberando progresivamente toda la energía que ha ido acumulando en la etapa de calentamiento.

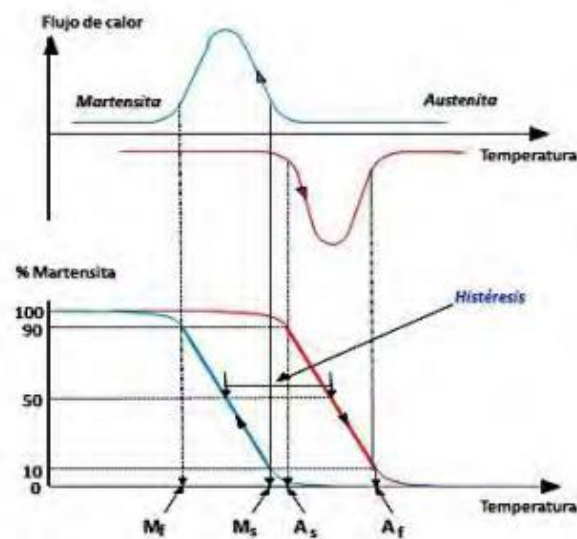


Figura 7: Diferencia de flujo de calor en un SMA.

Como se puede observar en la gráfica, al tratarse de un proceso reversible, la entalpía del proceso exotérmico se debe corresponder con la del endotérmico, es decir, que la energía acumulada en la fase de calentamiento sea igual a la liberada en el proceso de enfriamiento [3].

2.6. Las propiedades de los SMAs.

Las dos propiedades más significativas que se encuentran en este tipo de tecnología son el efecto memoria y la superelasticidad, ambas por supuesto basadas en las transformaciones martensíticas explicadas hasta el momento. Existen también otro tipo de propiedades derivadas de alguna de estas dos mencionadas, tal como el entrenamiento o doble efecto memoria, sobre la cual se ahondará también más adelante.

2.6.1 Propiedad de la memoria.

Este fenómeno también conocido como efecto de la memoria simple consiste en la capacidad que tiene un material para deformarse a través de una tensión externa, para luego volver a recuperar su forma original mediante el calentamiento del material. Se pueden distinguir dos clases: por transformación y por reorientación [7][8].

2.6.1.1 Efecto memoria por transformación.

Este fenómeno tiene lugar cuando se infiere una transformación a temperatura constante de austenita a martensita (siendo esta temperatura siempre mayor a M_f y menor a A_s). Resultando así una martensita y una deformación que permanecen aun habiendo eliminado ya la tensión. Para recuperar su forma original se aplicará la transformación de martensita a austenita, para lo cual simplemente habrá que inducir un calentamiento libre de tensión [3].

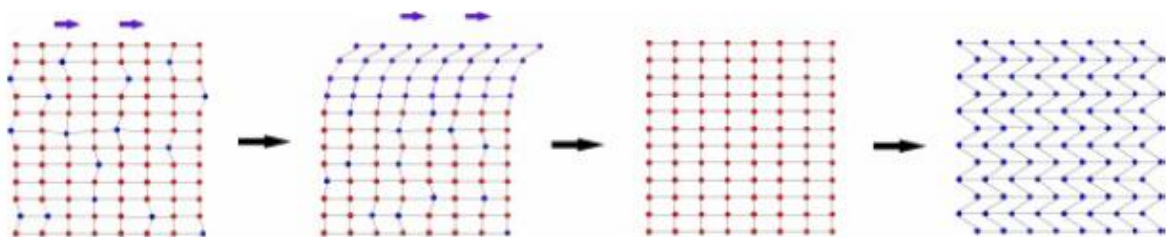


Figura 8: Proceso del efecto memoria por transformación [3].

Como se puede observar en la figura superior, se parte de una estructura que contiene tanto austenita como martensita, que al someterla a una tensión inferior a A_s se comprueba en la segunda estructura que parte de la austenita se ha convertido en martensita. Después, tras terminar de someterlo a una tensión y calentar el material por encima de A_f se puede transformar toda la martensita en austenita. Por último, como se puede observar en la estructura del final, si se enfría el SMA se puede conseguir que toda la austenita se transforme en martensita.

2.6.1.2 Efecto memoria por reorientación.

Exponiendo el material a una temperatura inferior a M_f durante la tensión, es decir, cuando es todavía 100% martensita, se produce una reorientación de las variantes de la martensita generando así una deformación. Si se calienta el material a temperaturas superiores a A_s se recuperará la forma original [3].

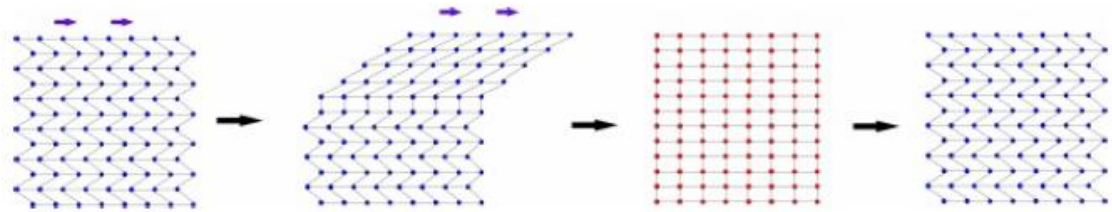


Figura 9: Proceso del efecto memoria por reorientación [3].

Como se observa en la imagen, partiendo de un SMA totalmente martensítico se le deforma aplicando una tensión. Para recuperar la forma original del material, éste es calentado por encima de A_s , transformándose así la martensita en austenita. Por último, si se deja enfriar el material se recuperará la estructura martensítica inicial.

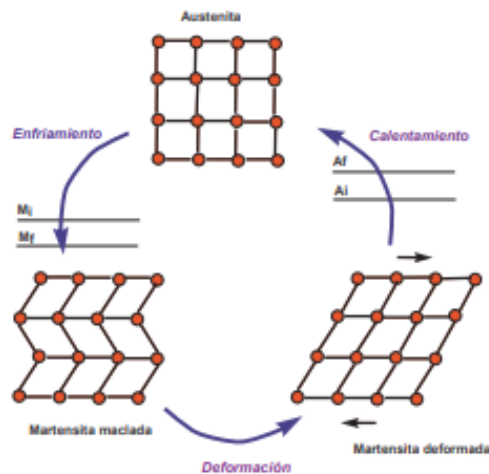


Figura 10: Diagrama del efecto memoria por reorientación [7].

2.6.2 Superelasticidad.

Esta propiedad también conocida como memoria mecánica es la responsable de que el material pueda ser deformado repetidamente en torno hasta un 8% y que tras la liberación de la carga el material vuelva a su forma original.

Al igual que en el caso de la propiedad de la memoria de forma aquí también se encuentran dos tipos de superelasticidad; teniendo por un lado la superelasticidad por transformación y por el otro la superelasticidad por reorientación [8].

2.6.2.1 Superelasticidad por transformación.

En este primer caso, al trabajar desde una temperatura superior a la de austenización, al aplicarse una tensión el material, éste se deforma y endurece, formando martensita. Cuando se cesa la aplicación de la tensión, al ser la temperatura todavía alta, tiene suficiente energía como para recuperar la forma original [3].

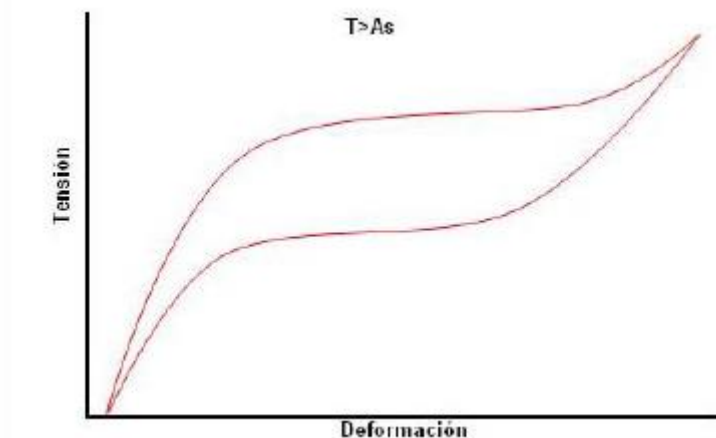


Figura 11: Gráfica del efecto superelástico por transformación [3].

En el caso de que la tensión fuera lo suficientemente grande como para que toda la austenita inicial se transformase en martensita se correría el riesgo de entrar en la zona plástica o inelástica.

2.6.2.2 Superelasticidad por reorientación.

Es un proceso similar al de transformación, sólo que en este caso se parte de una temperatura baja y por lo tanto martensita. Al aplicar una tensión las variantes de martensita sufren una reorientación quedándose por tanto el material deformado [3].

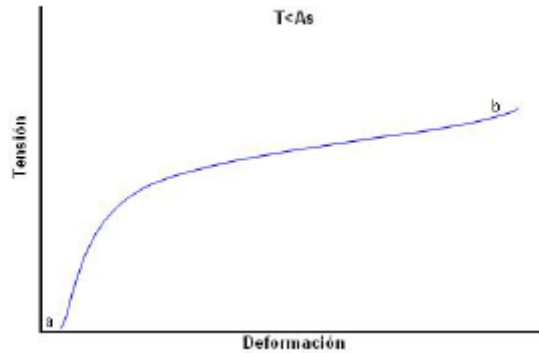


Figura 12: Gráfica del efecto superelástico por reorientación [3].

Aplicando una tensión en sentido contrario se volverá a deformar quedando como se encontraba al principio.

2.6.3 Doble efecto memoria.

Tal y como se comentó previamente, existen una serie de propiedades derivadas de estas dos ya analizadas, como es el caso del doble efecto memoria o TWSME (Two-way Shape Memory Effect), que aparece al someter al material a un proceso de entrenamiento especial [7].

Esta propiedad consiste en que en vez de que el material recuerde una sola forma sea capaz de recordar dos. Para ello se somete al SMA a una serie de ciclos térmicos en los cuales se le asigna al material una forma tanto a una temperatura alta como a una temperatura baja, siendo así capaz por tanto de recordar ambas.

Por otro lado, si bien es cierto que esta propiedad supone una gran ventaja también es cierto que presenta otro gran inconveniente, ya que la deformación que es capaz de recuperar el SMA mediante este proceso es aproximadamente la mitad de lo que sería capaz de recordar mediante el efecto de memoria simple. Este fenómeno es atribuible a que las tensiones internas generadas durante el entrenamiento influyen de forma directa en el crecimiento de la martensita.

Una vez explicado el principio fundamental en el que se sustenta esta propiedad, es preciso añadir que para el desarrollo de la misma no existe una sola técnica o método, sino que existen varios, algunos de los cuales serán explicados a continuación.

2.6.3.1 Métodos para el entrenamiento de un SMA de nitinol.

El primer método se basa en la sobredeformación de la fase martensítica, es decir, el material será enfriado a una temperatura por debajo de M_f (T^a a la cual se encuentra un 100% de Martensita) y será sometido a una severa deformación excediendo así el límite de completa recuperación. Luego se procederá a calentar por encima de la temperatura de austenización (A_f) y debido a la excesiva deformación antes producida se observará que el material no recupera totalmente su forma original [7].

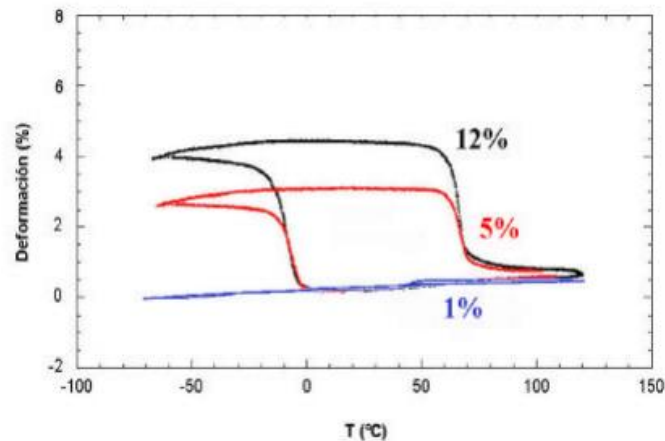


Figura 13: Gráfica del entrenamiento de un SMA mediante sobredeformación [10].

El segundo método es el entrenamiento mediante ciclo pseudoelástico a tensión constante, en el cual se parte de una estructura con austenita y se la somete a variaciones drásticas de temperatura, manteniendo en todo momento una presión constante sobre el material [7].

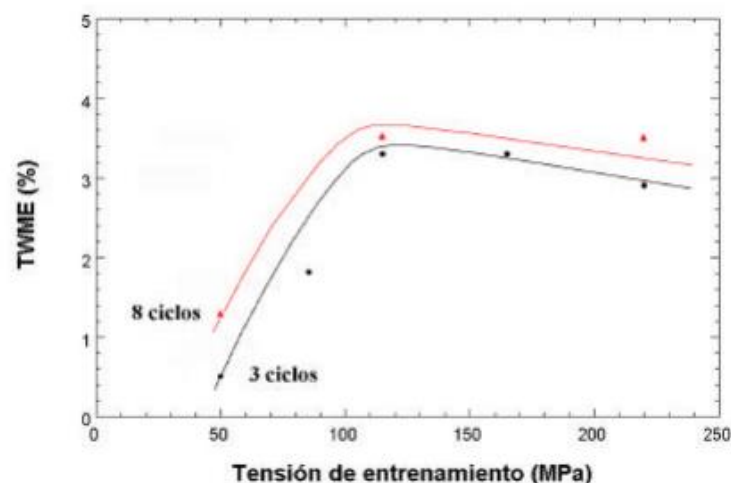


Figura 14: Gráfica de entrenamiento de un SMA mediante ciclo pseudoelástico [9]

El tercer método se conoce como entrenamiento por aplicación de ciclo térmico en martensita forzada y deformada, en el cual primero se enfría el material por debajo de

Mf y se deforma obteniéndose así martensita inducida por tensión. Luego se fija esa posición deformada y se calienta por encima de la temperatura de austenización Af [7].

2.7. Carga en el SMA.

Hasta el momento se ha venido hablando de una carga o tensión que ha estado vinculada permanentemente con la deformación del material para que este pudiese actuar, pero no se ha señalado el motivo de su existencia. Pues bien, esta tensión o carga es un elemento fundamental en el funcionamiento del SMA ya que si no existiese no podría ser deformado para volver a ser actuado de nuevo.

Es importante destacar también la cantidad de carga como parámetro a tener en cuenta, ya que conforme mayor es la tensión que se le aplica al material, mayor será la cantidad de energía que hay que suministrarle al mismo, y mayor será también por tanto su temperatura característica [3][7].

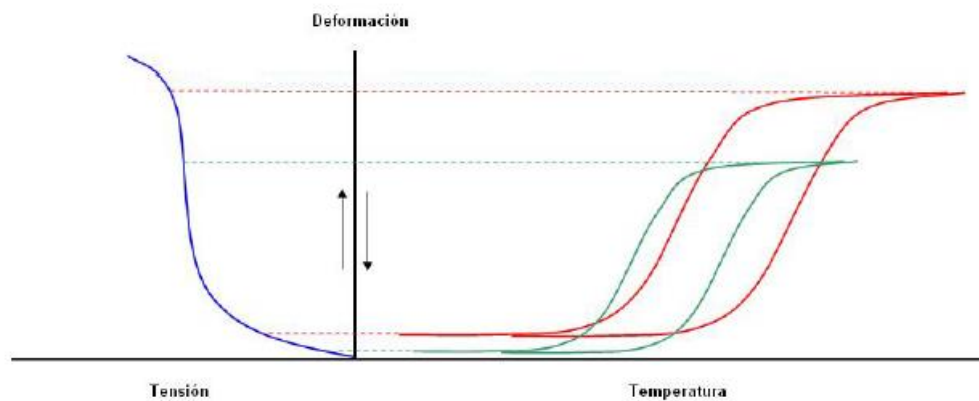


Figura 15: Efecto de la carga en la histéresis [3].

Tal y como se puede observar en la imagen, para una determinada tensión hay tanto una temperatura característica (histéresis verde) como una deformación asociada. Al aumentarse la tensión se comprueba que efectivamente el material se deformará más, pero que inevitablemente este fenómeno irá acompañado de un incremento en la temperatura característica.

Este hecho queda reflejado mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron, habitualmente utilizada en el modelado de sistemas de este tipo de materiales.

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H}{\Delta V}$$

2.8. Aplicaciones de los SMA.

Hoy en día el uso de la tecnología SMA está muy extendido siendo principalmente utilizados a modo de actuador, encontrándose por un lado aplicaciones basadas en la propiedad de memoria de forma (tanto simple como doble) y por otro en la propiedad de superelasticidad.

En lo referido a las primeras, es común el uso del SMA por ejemplo para el conexionado de tubos o piezas, en los cuales tras dilatar en frío la junta (hecha de un material SMA), se introduce en la misma los dos tubos. Al calentarse, la junta recupera su forma original uniendo así ambas partes. Una aplicación muy utilizada de los SMAs en el mundo de la medicina es el despliegue y transporte de mercancías, consistente en deformar el objeto en cuestión para facilitar su traslado y posteriormente aplicarle calor para que recupere su forma previa. Como se puede observar estos dos casos son ejemplos de aplicaciones de SMA de un solo uso, aunque también existen situaciones en las que se utilizan sus propiedades repetidamente, como es el de la acción simple con recuperación. En este caso, se deforma el material mediante un muelle a bajas temperaturas (comprimiéndolo o estirándolo), para que cuando se le aplique calor posteriormente, éste recupere su forma original. Al hacerlo el muelle almacena energía (comprimiéndose o estirándose) iniciando así el proceso nuevamente.

Actualmente en el área de la robótica, se están desarrollando unos prototipos de trajes o mallas en los que al circular corriente (aplicando calor por tanto), se contrae una parte del mismo en el que irán enfundados distintas partes del cuerpo como brazos, piernas, etc... facilitando así por ejemplo la rehabilitación de pacientes.

Por otro lado, se encuentran las aplicaciones basadas en la propiedad superelástica, las cuales están enfocadas prácticamente en su totalidad al mundo de la medicina. El principal producto son los llamados *stents*, unas microestructuras auto expandibles usadas para tratar obstrucciones en conductos u órganos con cavidades [10]. La cualidad de estas microestructuras es que tienen una gran capacidad de plegado (facilitando así su inserción en la cavidad en cuestión), para luego expandirse en torno a cuatro veces su tamaño de radio comprimido ejerciendo una fuerza constante y radial en la cavidad.

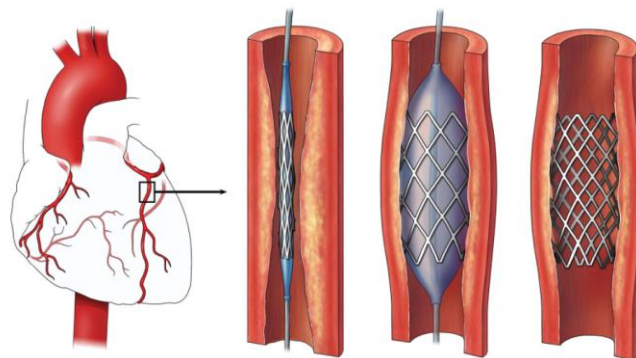


Figura 16: Aplicación de un SMA en un vaso cardiovascular.

Otra rama en la que tiene gran incidencia la propiedad superelástica de los SMA es la de la odontología, en la cual es importante que se ejerzan fuerzas no demasiado grandes y sobre todo continuas en el tiempo, encontrándose el principal ejemplo en las ortodoncias, ya que la tensión constante que estos materiales pueden ejercer produce muy buenos resultados en la remodelación de los huesos bucales [10].



Figura 17: Aplicación de un SMA como aparato dental.

2.9. Ventajas e inconvenientes.

Entre las bondades de este tipo de materiales se encuentran: su capacidad para ejercer tanto fuerzas grandes como pequeñas, el ahorro de masa y volumen respecto a otro tipo de actuadores, su carácter silencioso (el cual evita problemas por perturbaciones generadas por ruido), su precio y sobre todo su fiabilidad, ya que no presenta problemas en el proceso de actuación al encontrarse delimitados sus despliegues máximos y mínimos.

Por otro lado, entre sus principales desventajas se hallan: su lentitud, su ineficiencia energética (al perderse la mayor parte de la energía por disipación térmica), así como su menor rango de deformación respecto a otros actuadores y sobre todo su falta de precisión, ya que su marcado carácter no lineal vuelve complejo su manejo.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS MEDIOS EMPLEADOS

Para que fuese posible la realización de los experimentos llevados a cabo durante este proyecto se ha precisado de una serie de elementos que serán descritos a continuación, pero antes de pasar a su explicación, es importante que para un mejor entendimiento de los mismos, se recuerde el objetivo de dicho proyecto.

El principal cometido de este trabajo era encontrar una relación entre la corriente que circula por el hilo de *nitinol* o la impedancia de dicho hilo y la posición, que permitiese conocer esta última (el hilo se contrae al aplicarle calor) sin la necesidad de un detector de movimiento.

Por ello, se encuentran entre los elementos físicos:

3.1. Banco de trabajo.

Es la estructura sobre la cual se van a realizar todos los experimentos y consta de una superficie de madera, que servirá de apoyo a la estructura de plástico, que alberga el imán que servirá de referencia al detector de posición para saber cuánto se ha movido el hilo a lo largo del experimento. El imán está situado encima de un carrito de plástico móvil atado al hilo de nitinol, el cuál en el otro extremo está unido a dos discos de 1000g y 500g. Un rodillo de plástico hace posible la subida y bajada del hilo sin crear rozamiento con la superficie de madera.

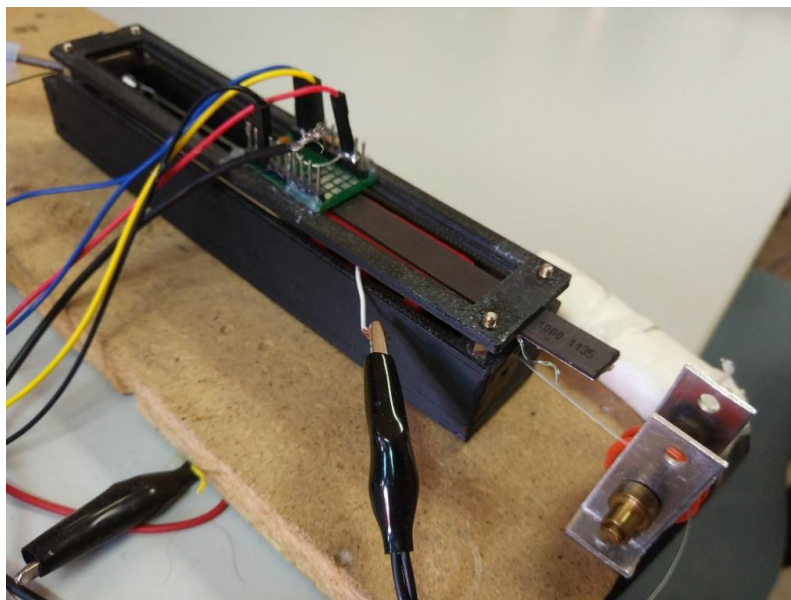


Figura 18: Banco de trabajo.

3.2. Hilo de nitinol.

Es el verdadero protagonista del proyecto al girar todo el trabajo a su alrededor debido a sus propiedades características ya comentadas previamente. El hilo usado en cuestión es de 1 milímetro de diámetro.

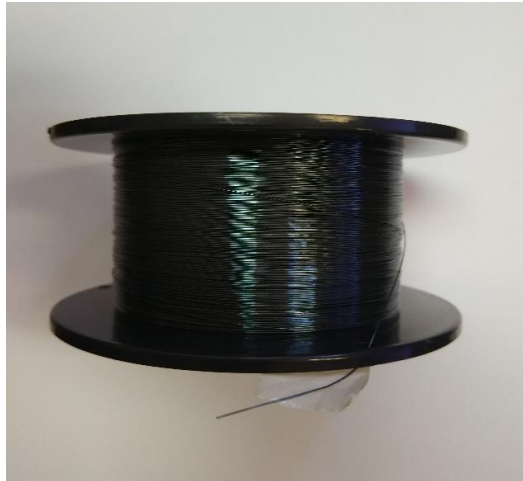


Figura 19: Hilo de nitinol.

3.3. Discos de pesas.

Su función es la de ejercer un peso que estire y deforme el hilo de nitinol, para que luego al calentar recupere su forma original. Se han realizado ensayos con distintos pesos: 100 g, 200g, 300g, etc, aunque el peso utilizado para la mayoría de los ensayos ha sido de 1.500 gramos, dado que es el peso que se asemeja con partes del cuerpo humano como el antebrazo o el pie.



Figura 20: Pesas de 1000 gramos y 500 gramos.

A continuación, se procederá a explicar tanto los distintos elementos hardware como el software que han sido utilizados en este proyecto.

3.4. Elementos Hardware.

3.4.1 Tarjeta STM32F4 Discovery.

Se trata de un kit correspondiente a la familia *STM32*, por lo que está implementado mediante microcontroladores flash de 32 bits, siendo en concreto el *STM32F407VG* y teniendo una arquitectura de procesador *ARM Cortex-M*. Se ha escogido este microcontrolador en particular ya que permite gran cantidad de funcionalidades en comparación con el resto de microcontroladores del mercado actual.

Entre las principales ventajas de este tipo de microcontroladores se encuentran:

- . Gran capacidad de computación.
- . Gran velocidad de operación.
- . Gran capacidad de memoria.
- . Entorno de desarrollo sencillo e intuitivo.
- . Polivalencia respecto a diferentes periféricos.
- . Precio económico.

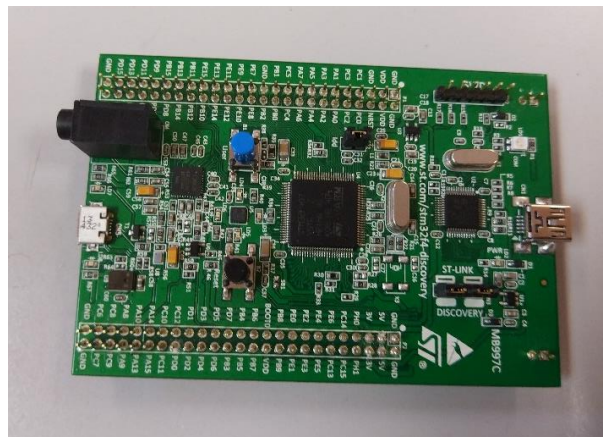


Figura 21: Tarjeta de adquisición Discovery STM32F407VG

3.4.2 Etapa de potencia.

Para poder suministrar la alimentación necesaria al hilo de SMA se hace preciso una etapa de potencia que haga llegar el pulso PWM generado por el microcontrolador STM32F407VG. Su función, por tanto, será la de regular la cantidad de corriente que reciba el hilo de SMA, suministrando el 100% de la misma los 2 primeros segundos de cada ensayo, y prácticamente nula el resto del tiempo.

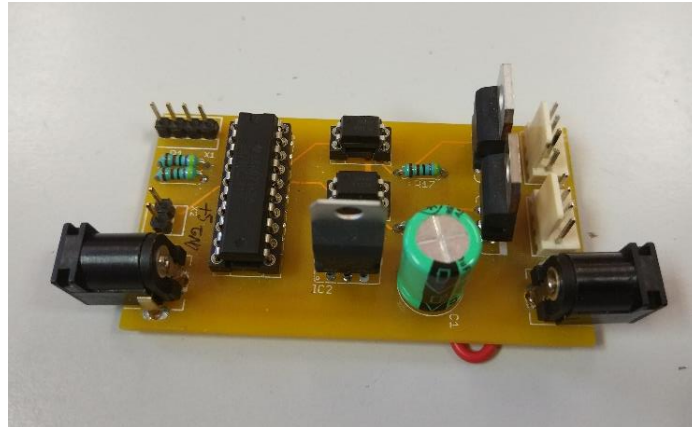


Figura 22: Tarjeta de electrónica de potencia.

3.4.3 Fuente de alimentación.

Se encargará de suministrar permanentemente un voltaje de 15 voltios. Se ha usado el modelo PL 155-P de la marca Aim-TTi por su versatilidad y fiabilidad.

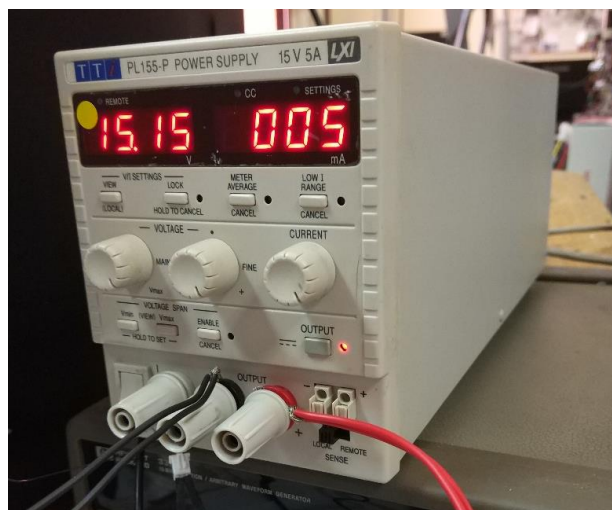


Figura 23: Fuente de alimentación de Aim-TTi.

3.4.4 Sensores.

3.4.4.1 Sensor de posición (*Tracker NSE-5310*).

Es el segundo elemento más importante, ya que gracias a este dispositivo se es capaz de medir el desplazamiento del hilo de nitinol al calentarse o enfriarse. Como ya se ha comentado anteriormente, el objetivo es conseguir saber dicho desplazamiento sin la necesidad de este tipo de dispositivo, pero para poder encontrar una relación entre la corriente/impedancia y la posición, hace falta conocer el desplazamiento asociado a ellos, por lo que inicialmente este dispositivo se hace indispensable.

El detector elegido ha sido el *Tracker NSE-5310*, modelo usado frecuentemente en la instrumentación industrial y sobre todo en entornos de precisión biomédica como es en este caso.

Entre sus múltiples bondades se encuentran:

- . Tamaño muy pequeño con unas dimensiones de 3.9 x 2.5 mm.
- . Muy preciso, con una resolución de 0.5 micras.
- . Salida digital I2C.
- . Sistema de sensado y codificación completamente integrado en el chip.
- . Muy robusto al estar especialmente acondicionado a vibraciones externas.

Su funcionamiento, como ya se mencionó previamente, está basado en el efecto Hall, el cual consiste en que al hacer pasar una corriente eléctrica a través de un conducto de cobre se genera un campo magnético. Este campo es medido por el sensor integrado Hall IC que lo convierte a un voltaje proporcional.

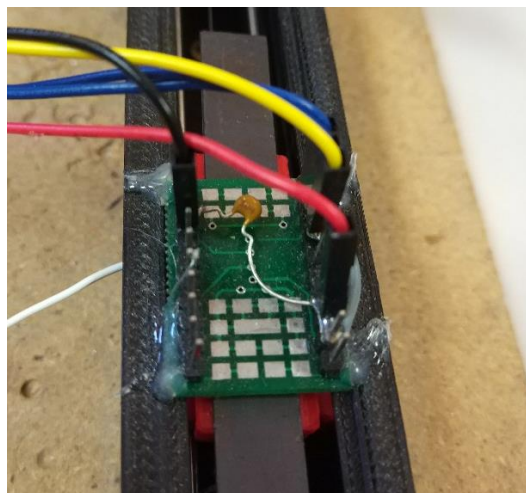


Figura 24: Sensor de posición NSE-5310.

3.4.4.2 Sensor de corriente (*Allegro ACS722*).

Es uno de los elementos más importantes, ya que su labor es la de medir la corriente que se genera al suministrar voltaje la fuente de alimentación. Dicho valor de la corriente posteriormente será mandado por un puerto analógico a la tarjeta.

Se ha elegido el detector de posición *Allegro ACS722*, de carácter I2C, el cual se caracteriza por su polivalencia al servir tanto para AC como DC. Entre sus principales características se encuentran que se trata de un dispositivo económico, que proporciona entre 3 y 3,6 voltios, con una prácticamente nula histéresis magnética, así como su tamaño reducido, lo cual lo hace ideal para aplicaciones con limitaciones de espacio.

Este sensor será colocado en serie entre la etapa de potencia y el hilo de SMA, transmitiendo de esta forma continuamente la información de la corriente o impedancia (que irá variando en función de la longitud del hilo) a la etapa de potencia.

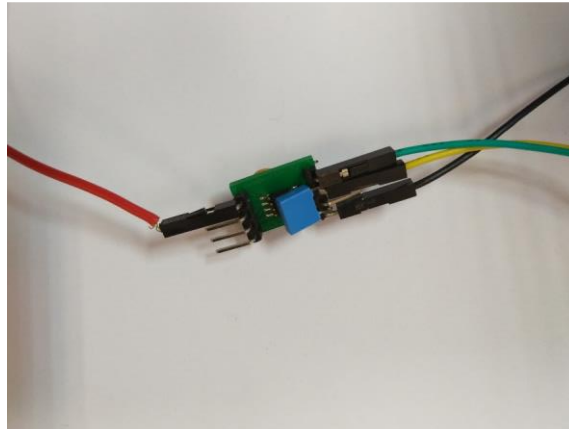


Figura 25: Sensor de corriente Allegro ACS 722.

4. SENSADO

4.1. Software.

El software que se ha utilizado durante todo el proyecto tanto para el sensado como para la interpretación de los datos está basado en el lenguaje de programación Matlab y sus herramientas derivadas. En concreto, para la mayor parte del diseño y programación del proyecto se ha usado un entorno de programación visual con un grado de abstracción mayor al que posee el propio *Matlab* conocido como *Simulink*. Dicho entorno ha permitido realizar el diseño y programación de las diferentes partes del trabajo de una manera sencilla e intuitiva.

En lo que al sensado o medición se refiere se ha dividido en dos bloques bien diferenciados; por un lado, se encuentra el *Target* y por otro el *Host*.

4.2. Target.

Es la interfaz en la cual se ha implementado la programación de los bloques encargados de la medición del sensor, así como de la comunicación con el microcontrolador.

A continuación, se procederá a explicar cada una de las partes y bloques diseñados en esta interfaz:

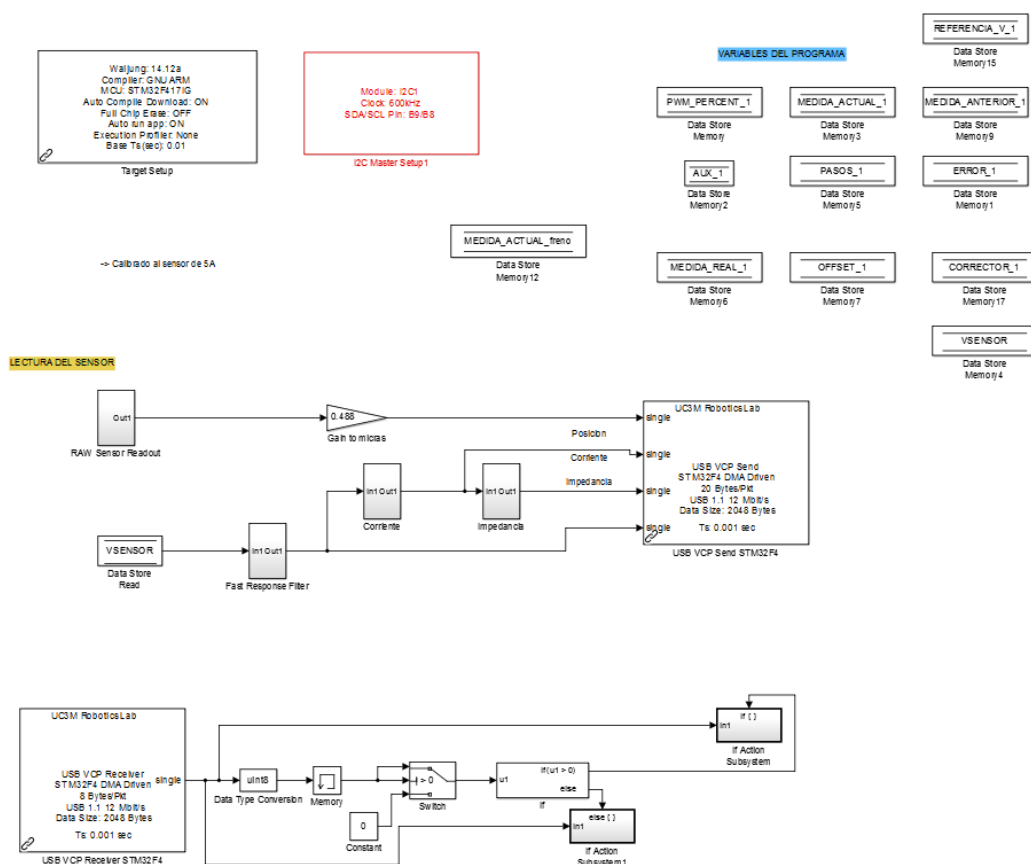


Figura 26: Vista general de la interfaz del Target.

4.2.1 Variables.

Por un lado, se encuentran todas las variables utilizadas durante la elaboración del programa, en las cuales se irán almacenando los valores que o bien vaya midiendo los diferentes sensores o bien sirvan como variables auxiliares. La mayoría de estas variables se irán explicando conforme se vaya desgranando el contenido de cada uno de los bloques que conforman el programa.

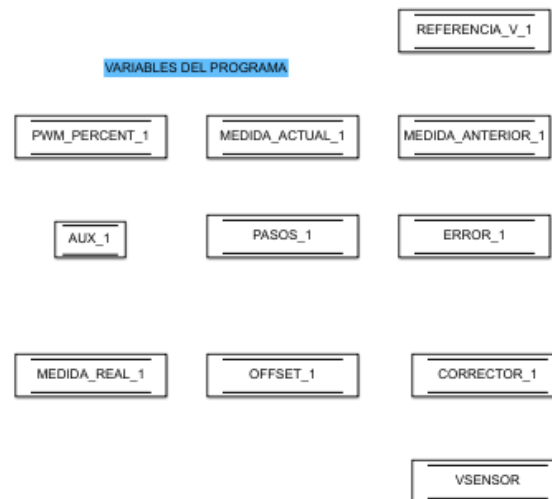


Figura 27: Variables del programa.

Por otro lado, se muestran las especificaciones del microcontrolador, al cual estará conectado permanentemente y que, en caso de producirse cualquier tipo de apagado del sistema o desconexión de la CPU, saltará un aviso interrumpiéndose la ejecución del programa.

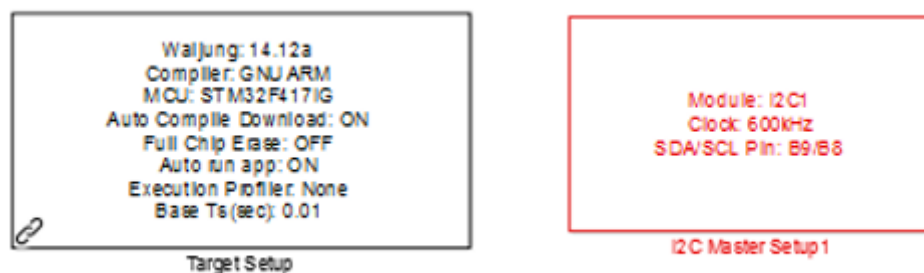


Figura 28: Especificaciones del microcontrolador

También se muestra en todo momento los pines de los puertos a los que debe ir conectado el I2C, en concreto, el PB8 al clock y el PB9 al SDA.

4.2.2 Entrada de datos en la tarjeta.

Antes de que se pueda medir, es fundamental conectar y cargar los datos en la tarjeta de adquisición. En este apartado se explicará cómo recibe los datos la tarjeta en función de las circunstancias.

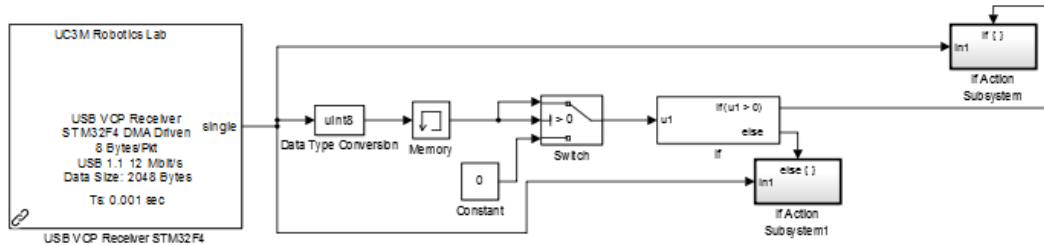


Figura 29: Diagrama de bloques de las ramas de calentamiento y enfriamiento

Como se puede observar en la imagen hay dos ramas bien diferenciadas, que se corresponden con dos situaciones:

En la primera, referenciada mediante el bloque superior derecho, se trata cuando la corriente es mayor que cero, es decir, cuando la etapa de potencia permite que circule el 100% de la corriente y el hilo SMA se encuentra por tanto calentándose durante 2 segundos.

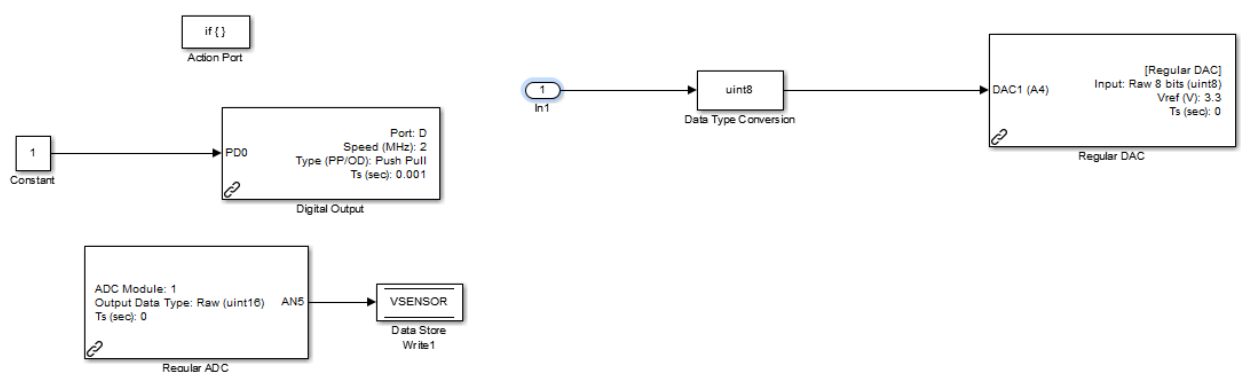


Figura 30: Rama de calentamiento.

Se observa pues, que el puerto PD0 es el de control, el PA5 es para el sensado de corriente, y el PA4 para medir de forma analógica, aunque no está implementado en este caso ya que se realiza de forma digital.

Por otro lado, se encuentra la posibilidad de que la etapa de potencia cierre el paso de corriente y no circule en un principio nada de la misma, situación que se corresponde con el bloque inferior.

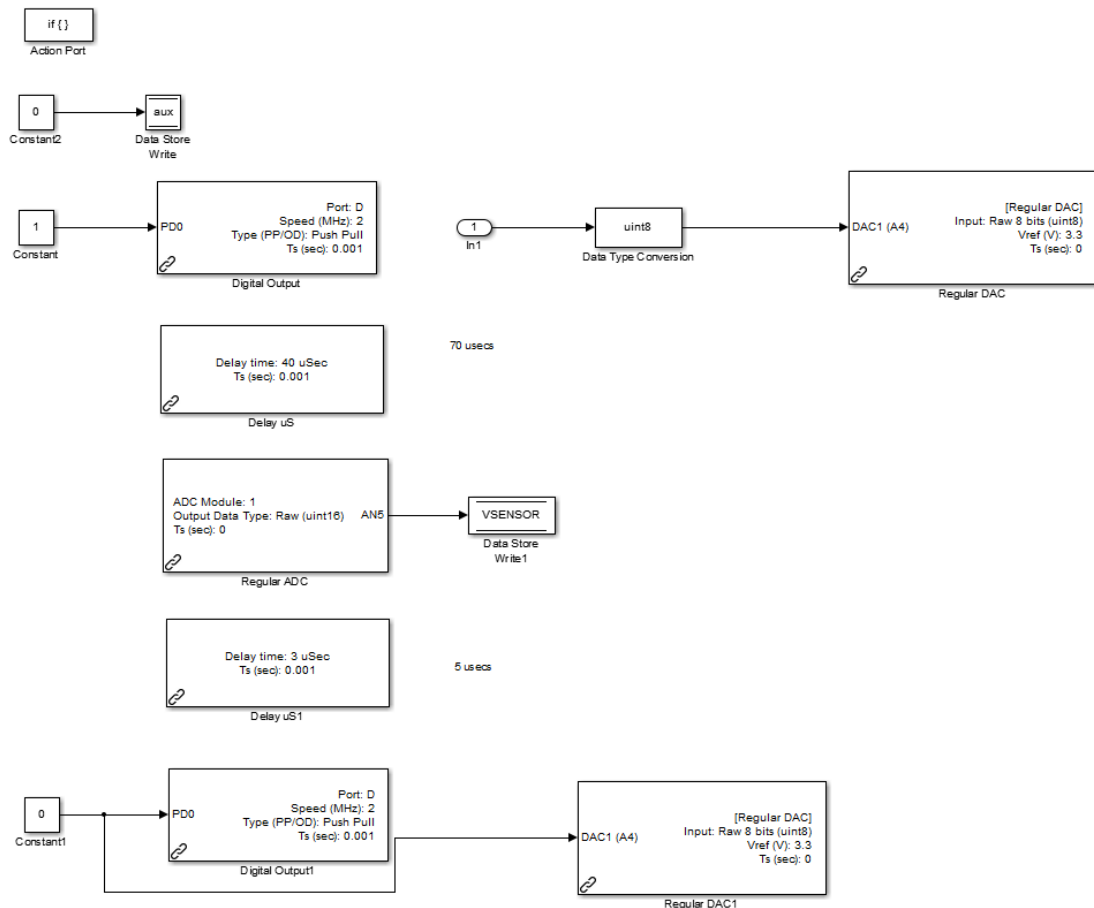


Figura 31: Rama de enfriamiento.

Tal y como se puede observar en el caso anterior, se encuentran todos los pines de los puertos que son conectados en la tarjeta, los cuales evidentemente son los mismos, pero en este caso aparecen además unos bloques que están directamente vinculados con el factor que le diferencia del otro caso: el bloqueo de la corriente.

Previamente se ha comentado que en esta ocasión la etapa de potencia cerraba el paso incapacitando así la circulación de corriente, pero de ser esto así no se podría medir nada de lo que ocurre durante los 118 segundos que dura la etapa de enfriamiento. Por ello, se combina el abrir el paso durante 40 microsegundos, con mantenerlo cerrado durante otros 3 microsegundos, pudiendo obtener así una lectura.

4.2.3 Lectura del sensor.

La parte más importante es la de la lectura del sensor, ya que es en ésta donde se va a medir tanto la corriente emitida por la fuente de alimentación como la posición del imán al calentarse el hilo de SMA.

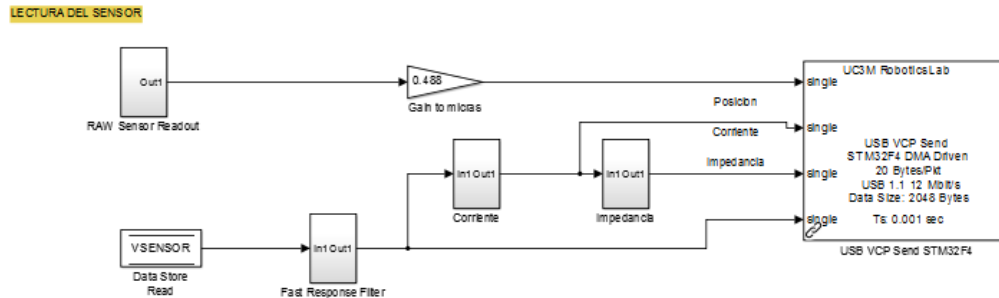


Figura 32: Bloques usados para la lectura del sensor.

4.2.3.1 Sensado de corriente.

El sensor de corriente *Allegro ACS722* recibe una corriente que se genera al aplicarle una diferencia de potencial a la impedancia del hilo, dicha corriente será medida y enviada mediante un puerto analógico a la tarjeta de adquisición *STM32F4 Discovery*. En ese momento esta información es leída y guardada en la variable *vsensor*, para posteriormente ser filtrada mediante un filtro paso bajo y ser enviada nuevamente a la CPU mediante el puerto USB.

Esta corriente que se genera ya va variando en función de la impedancia del hilo, que a su vez depende de la longitud del mismo ($\frac{\rho \cdot L}{S}$) que varía al calentarse y enfriarse. Como en ningún momento se procede a medir la impedancia del hilo, para conocerla simplemente hay que aplicar una sencilla ley de Ohm. Esta impedancia resultante también será enviada mediante puerto USB a la CPU. Como ya se comentó anteriormente, hay una etapa en la que la corriente es nula, por lo que para evitar indeterminaciones se le suma una corriente muy pequeña de forma que nunca sea 0.

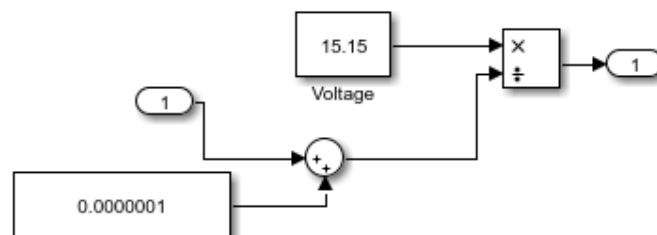


Figura 33: Ley de Ohm para hallar la impedancia.

4.2.3.2 Sensado de posición.

Se ha utilizado la variable *RAWsensor* para almacenar y tratar todo lo concerniente a la detección de posición.

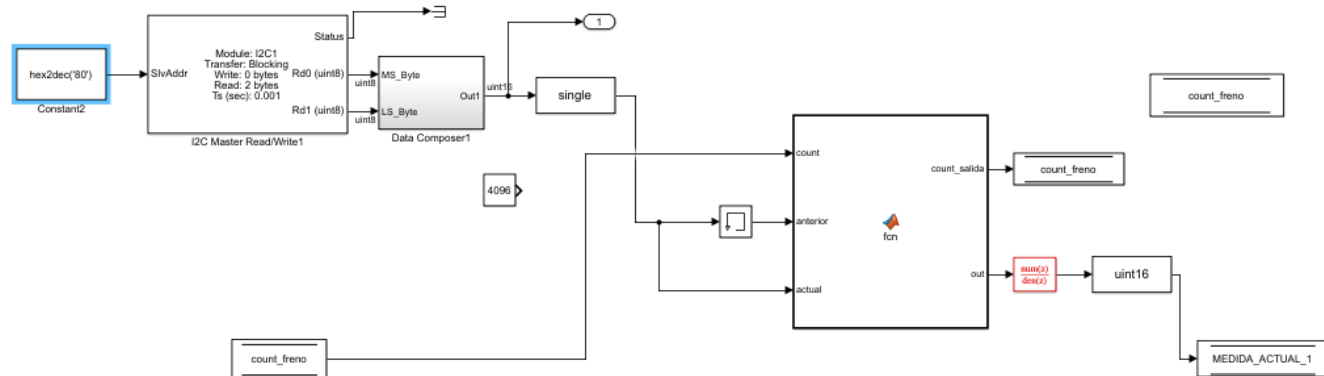


Figura 34: Vista general del bloque RAW Sensor Read Out.

Primeramente, se procede a “preguntarle” a la placa por el valor medido por el sensor, para ello se le manda un valor en hexadecimal al I2C como dirección, devolviéndole así la placa el valor de la dirección de memoria a la que se está intentando acceder, que será el valor del sensor.

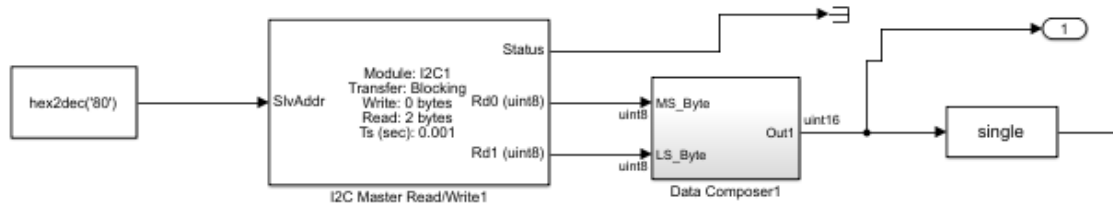


Figura 35: Bloques usados para comunicarse con la tarjeta.

Una vez leído el valor, éste llega en formato de 2 bytes, por lo que para poder trabajar y operar con él ha de transformarse a uno de 16 bits.

Una vez recibido ese valor es necesario analizar con qué se corresponde exactamente dicho parámetro en nuestro sistema, ya que eso es simplemente una medida en bruto que ha leído el sensor. Para ello, se utiliza un bloque de programación.

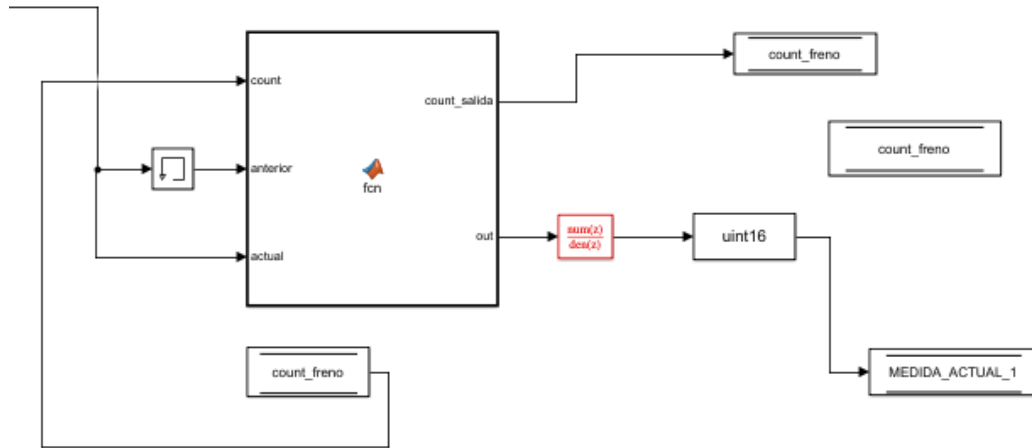


Figura 36: Parte del bloque RAW Sensor Read out dedicada a la programación del imán.

Para poder comprender la programación que se esconde en el bloque arriba mostrado es fundamental explicar antes el funcionamiento de nuestro sujeto de medidas, es decir, el imán.

El imán en cuestión no es uno al uso, es decir, con sus dos polos Norte y Sur bien diferenciados en cada uno de sus extremos, sino que se trata de una banda magnética multipolar, teniéndolos por tanto divididos a lo largo de su superficie cada 2 milímetros, lo cual facilita la detección al no tener el imán un recorrido muy amplio.

Esos 2 milímetros se corresponden con 12 bits, por lo tanto, el sensor tendrá una resolución de 2^{12} , es decir, de 4096 unidades. Teniendo así un valor absoluto cada 2 milímetros, pero para poder hacer una medición correcta, se necesita un valor absoluto de todo el imán.

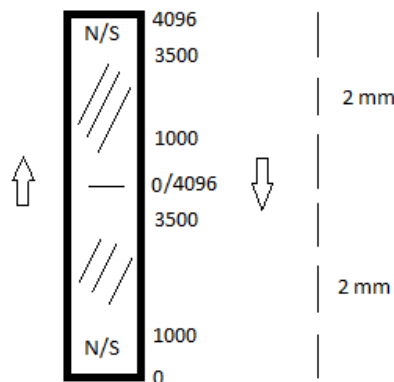


Figura 37: Esquema del funcionamiento del imán multipolar.

Por ello, la idea del funcionamiento se basa en comparar constantemente dos valores, para lo que primero lee uno, se espera un ciclo y luego lee otro. Si el primero se encuentra por debajo de las 1000 unidades (valor *anterior* en el código), y el segundo (valor *actual* en el código) está situado por encima de las 3500 unidades quiere decir que el imán está haciendo un recorrido negativo ya que se está encogiéndose y por tanto se encuentra en la fase de calentamiento. Si por el contrario el primer valor se encuentra por encima de las 3500 unidades y el segundo está por debajo de 1000, el imán estará haciendo un recorrido positivo, es decir, recuperando su forma inicial y por tanto encontrándose en la fase de enfriamiento.

Como se puede observar tanto en el esquema del imán como en el propio código sólo se han incluido estas dos opciones ya que en ningún momento se desea medir entre las zonas ralladas, ya que lo que se busca de esta manera es delimitar el espectro de medición y forzar a que tenga que pasar por la frontera, quedando registrado en el contador.

```
1 function [count_salida, out] = fcn(count, anterior, actual)
2     %#codegen
3
4     persistent x;
5     if isempty(x)
6         x = actual;
7     end
8
9     if(actual>3500)
10         if(anterior<1000)
11             count = count-1;
12         end
13     end
14
15     if(actual<1000)
16         if(anterior>3500)
17             count = count+ 1;
18         end
19     end
20
21     count_salida=count;
22
23
24
25     if(count==0)
26         out=actual-x;
27     else
28         out=4096*count+actual-x;
29     end
30
```

Figura 38: Código de la programación del imán multipolar.

Las dos últimas condiciones están destinadas a lo que se va a ir mostrando como medición. Por un lado, la primera de ellas sirve para quitarle el “*offset*” a la primera

medida, es decir, si no ha pasado todavía ninguna frontera y por tanto el contador está a cero, se le resta a esa medida su propio valor para comenzar de cero. Por otro lado, en la segunda se multiplican los contadores, es decir, el número de veces que ha pasado la frontera, sumándole la última medida que tiene registrada y restándole el *offset* inicial.

Una vez que se tienen los valores ya analizados se multiplican por una ganancia de 0.488, ya que ese es el valor que se corresponde para poder pasar de esas unidades antes calculadas a las micras del sistema de longitud decimal.

4.3. Host.

Se trata de una interfaz que permite observar e interactuar en tiempo real de una forma sencilla e intuitiva con los valores medidos anteriormente.

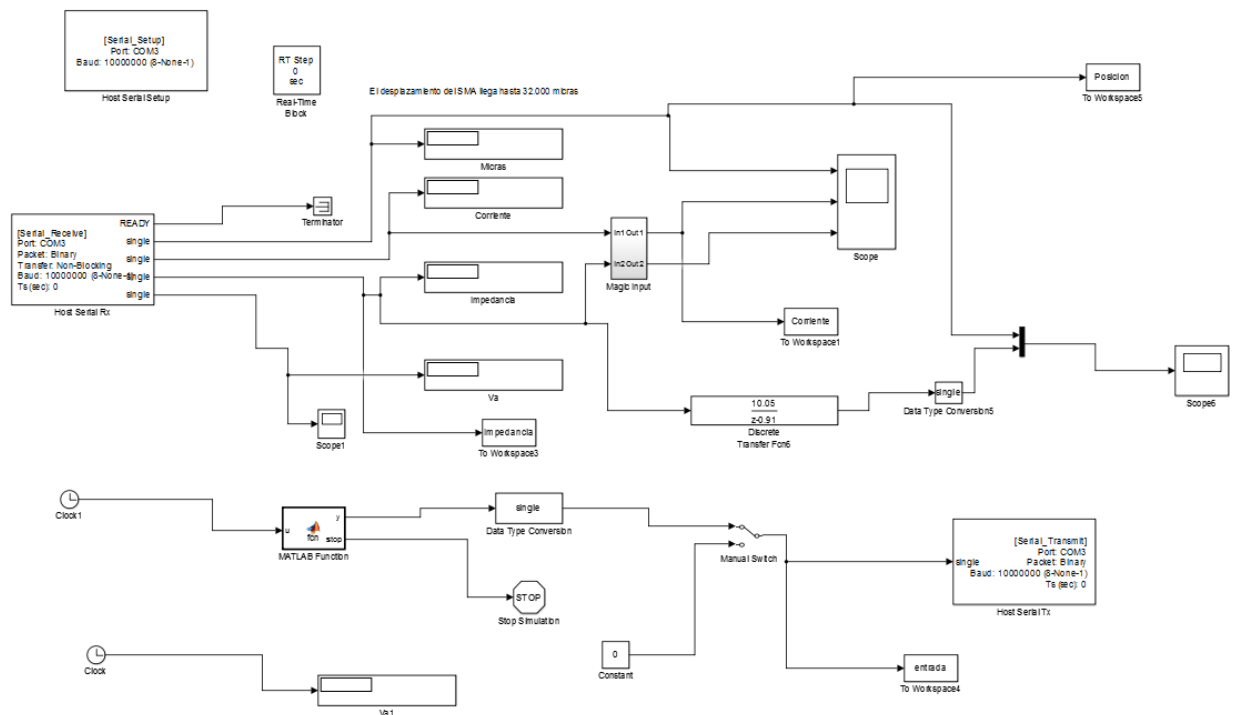


Figura 39: Vista general de la interfaz del Host.

Como se puede apreciar en la imagen arriba adjuntada, hay gran cantidad de bloques, esto se debe a que una gran parte de los mismos están destinados a mostrar en tiempo real las medidas de cada una de las variables del sistema, esto es: la corriente, la posición y la impedancia, así como a almacenar cada una de esas medidas en variables que serán exportadas directamente al “workspace” del programa *Matlab* para poder utilizarse luego en el análisis de las medidas.



Figura 40: Almacenamiento de las 3 señales en variables

Mediante estos bloques se puede ir comprobando si durante los 120 segundos que dura cada ensayo, se está midiendo correctamente tanto la posición, como la corriente y la impedancia.

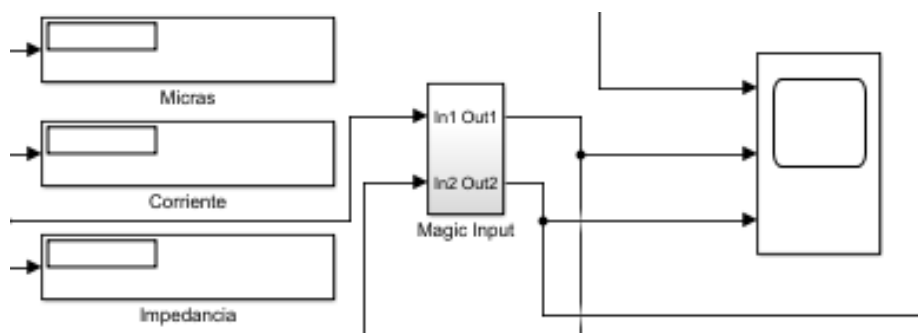


Figura 41: Bloques que muestran en tiempo real la posición, la corriente y la impedancia.

Pinchando en el bloque de la derecha llamado *scope*, se observa el graficado de las 3 funciones con el paso del tiempo.

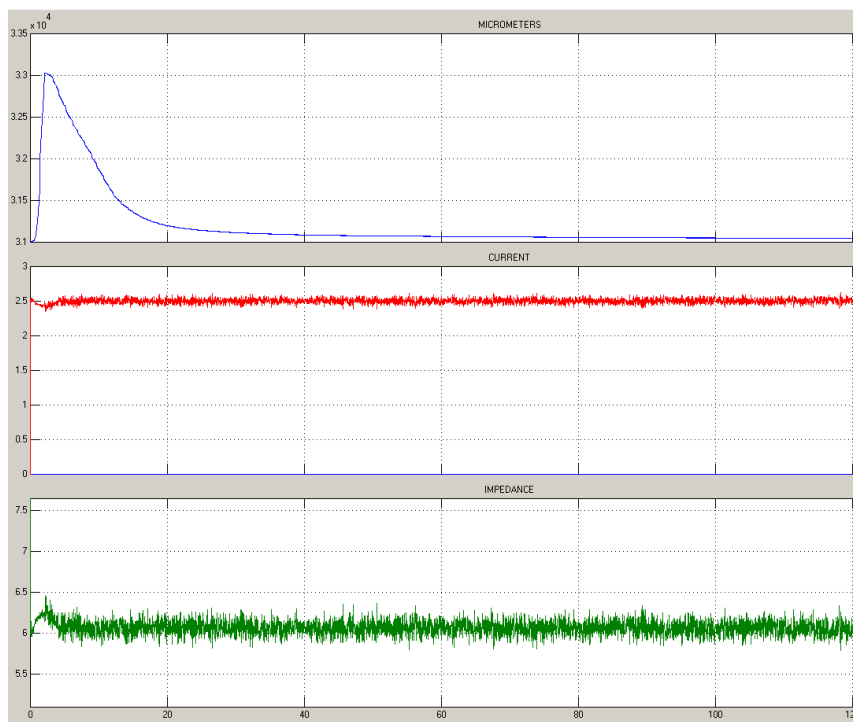


Figura 42: Gráficas mostrando un ensayo completo de las 3 señales.

Tal y como se ha mencionado previamente, los ensayos duran un total de 120 segundos, correspondiéndose los 2 primeros con la fase de calentamiento en la cual la etapa de potencia permite el paso del 100% de la corriente. Por consiguiente, los 118 siguientes pertenecen a la fase de enfriamiento, en los cuales como ya se ha explicado anteriormente, la etapa de potencia alterna breves intervalos de permitir el paso de la corriente y cerrarlo.

Se han diseñado por tanto unos bloques cuya principal función será tanto la de plasmar las condiciones anteriormente descritas, como la de comunicarse con la etapa de potencia. Por ello se ha incluido un bloque de programación Matlab con las condiciones, un reloj que muestre al usuario la cantidad de tiempo transcurrido, y una forma de parar de forma manual la ejecución del ensayo en caso de que fuese necesario mediante un clásico *switch*.

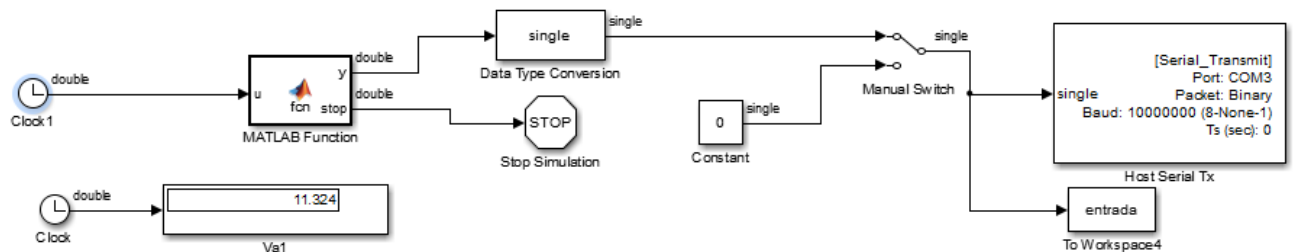


Figura 43: Bloques encargados de controlar el flujo de corriente y mostrar el tiempo de ensayo.

En lo que se refiere a la programación del bloque de funciones de Matlab, como se puede observar es muy sencilla e intuitiva, permitiendo el paso de corriente los 2 primeros segundos, cerrándola los 118 siguientes y en cualquier otro caso deteniendo el sistema de forma inmediata. Por supuesto, como entrada cuenta con un reloj, para que cuando empiece el ensayo, se inicie también la programación de este bloque.

```

1  function [y, stop] = fcn(u)
2  %#codegen
3  if (u<=2)
4  y=1;
5  stop=0;
6
7  elseif (u>2&&u<=120)
8  y=0;
9  stop=0;
10 else
11 stop=1;
12 y=0;
13 end

```

Figura 44: Código que controla el flujo de corriente.

En esta imagen se puede observar el comportamiento de nuestras señales medidas al pasar del calentamiento al enfriamiento:

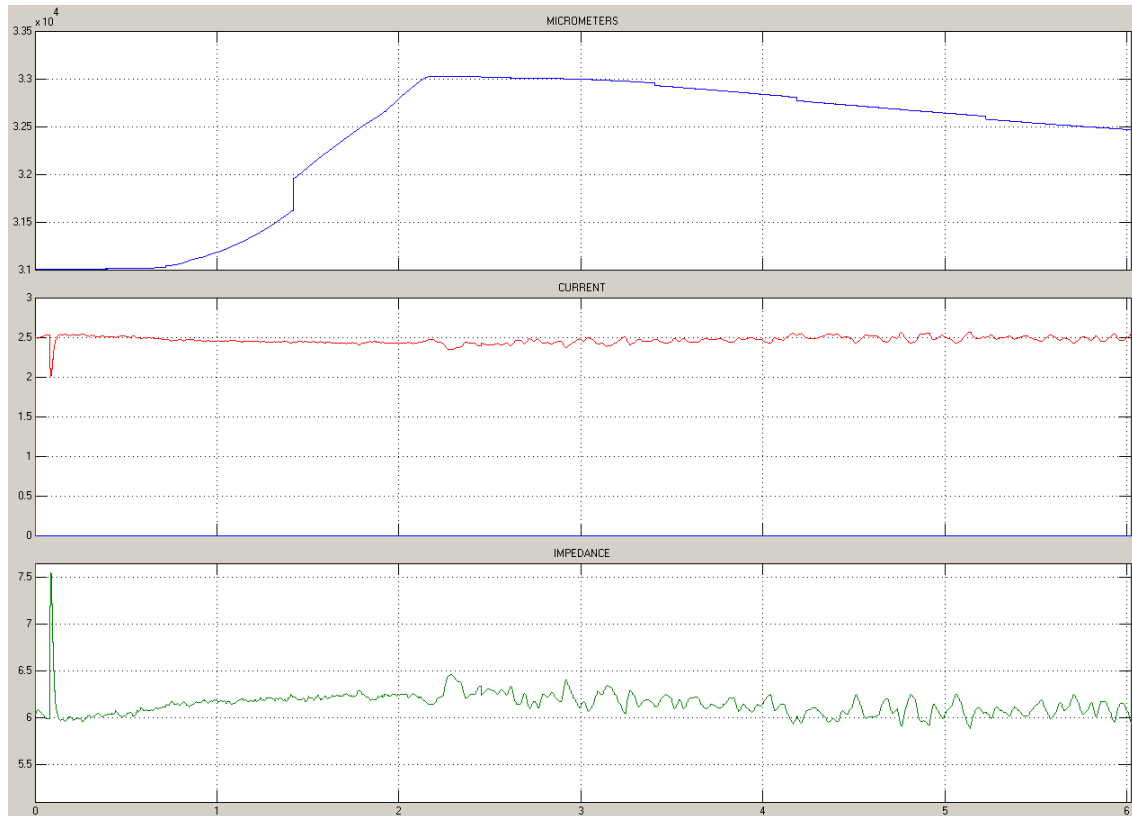


Figura 45: Gráficas mostrando la frontera entre las fases de calentamiento y enfriamiento de las 3 señales.

Como se puede apreciar, durante los 2 primeros segundos la posición experimenta un aumento en la gráfica al contraerse, debido a la transformación de la martensita del material en austenita al circular una corriente por el mismo y estar calentándose por tanto. Por otro lado, durante este mismo tiempo, se observan ligeras variaciones tanto en la corriente como en la impedancia, siendo más fácilmente distinguibles en la última.

A partir de los 2 segundos y una vez se le deja de suministrar corriente, el hilo irá recuperando poco a poco su forma original, por lo que se evidencia un descenso de la posición. En cuanto a la corriente y la impedancia, la medición en este tramo se vuelve más difusa al encontrarse gran cantidad de ruido debido al hecho de estar suministrándole corriente durante intervalos muy cortos.

5. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS Y RESULTADOS.

5.1. Calentamiento.

Tal y como se viene recordando hasta el momento, el proyecto consta de dos fases bien diferenciadas: calentamiento y enfriamiento, y dado que están realizadas bajo unas condiciones de medición diferentes cada una de ellas, se hace obligado analizarlas de forma separada.

Para ello, se utilizará la herramienta que proporciona Matlab conocida como *Toolbox system identification*:

5.1.2 Toolbox system identification.

Una vez se han realizado los ensayos y obtenido de forma pertinente las medidas, se procede al análisis de las mismas.

Es importante recordar una vez más el objetivo de estudio de este proyecto para entender mejor lo que se realizará a continuación; el cometido de este trabajo consiste en ser capaz de predecir el comportamiento de la posición del SMA únicamente a través de la impedancia obtenida, tanto en su fase de calentamiento (2 segundos) como en la de enfriamiento (118 segundos). Por tanto, en un principio, se procederá a crear un modelo comparando los datos de dos ensayos diferentes y resultando así una ecuación que al multiplicarse por la entrada del sistema (impedancia) debería resultar la salida del mismo (posición).

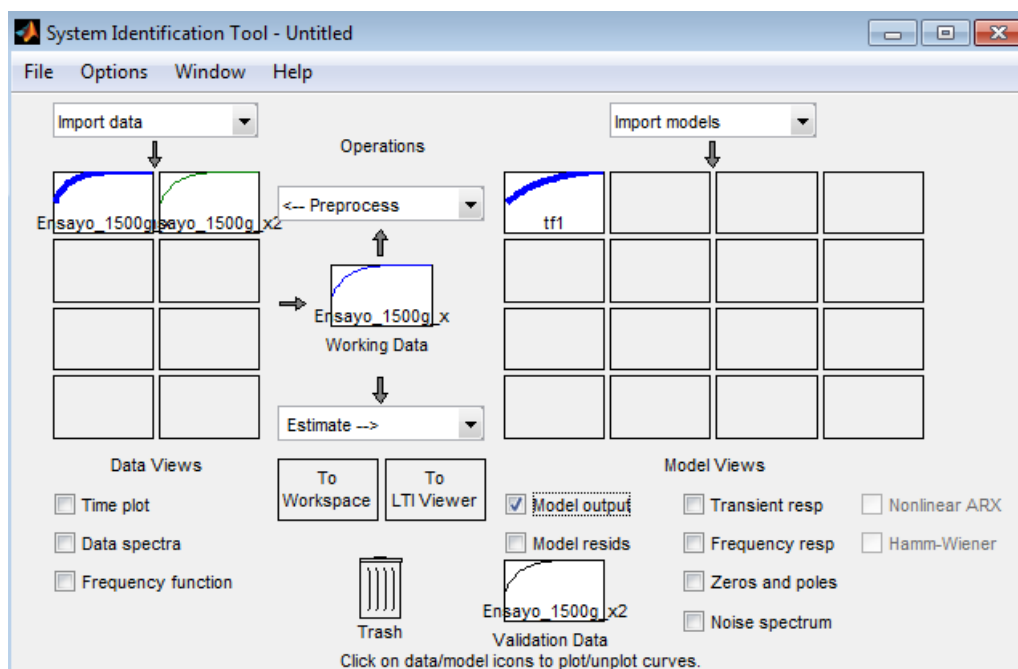


Figura 46: Vista general de la interfaz del Toolbox system identification.

Aquí se introducirán los datos medidos y guardados en variables en el *Host*, pero para poder usarlos antes habrá que pasarlos a un formato que entienda esta herramienta, siendo así imprescindible separar los dos tipos de señales en columnas diferentes y dado que se ha comenzado con la fase de calentamiento, los datos a introducir deben estar acotados dentro de este periodo, es decir 2 segundos (2.000 milisegundos).

```
load('Ensayo_1500g\Ensayo_1500g_3.mat')
t1511=double(Impedancial.time(5:1:2000));
P1511=double(Posicion.signals.values(5:1:2000));
I1511=double(Impedancial.signals.values(5:1:2000,1));
```

Figura 47: Código encargado de pasar al formato de la aplicación.

Una vez los datos han sido pasados al formato de la aplicación se introducen en la misma con el tiempo de muestreo deseado, en este caso de 1 milisegundo, ya que es el tiempo usado para medir en la fase de sensado.

The image shows a software dialog box titled "Data Format for Signals". It contains several sections: a dropdown menu set to "Time-Domain Signals"; a "Workspace Variable" section with "Input:" set to "I1511" and "Output:" set to "P1511"; a "Data Information" section with "Data name:" set to "Ensayo_1500g_3", "Starting time" set to "0.001", and "Sampling interval" set to "0.001". There is a "More" button below the sampling interval. At the bottom, there are four buttons: "Import", "Reset", "Close", and "Help".

Figura 48: Introducción de datos en la aplicación.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la herramienta compara dos ensayos, por lo que habrá que repetir este proceso otra vez con otra prueba diferente. Presionando la opción *time plot*, la aplicación muestra la comparativa de las dos señales a lo largo del tiempo.

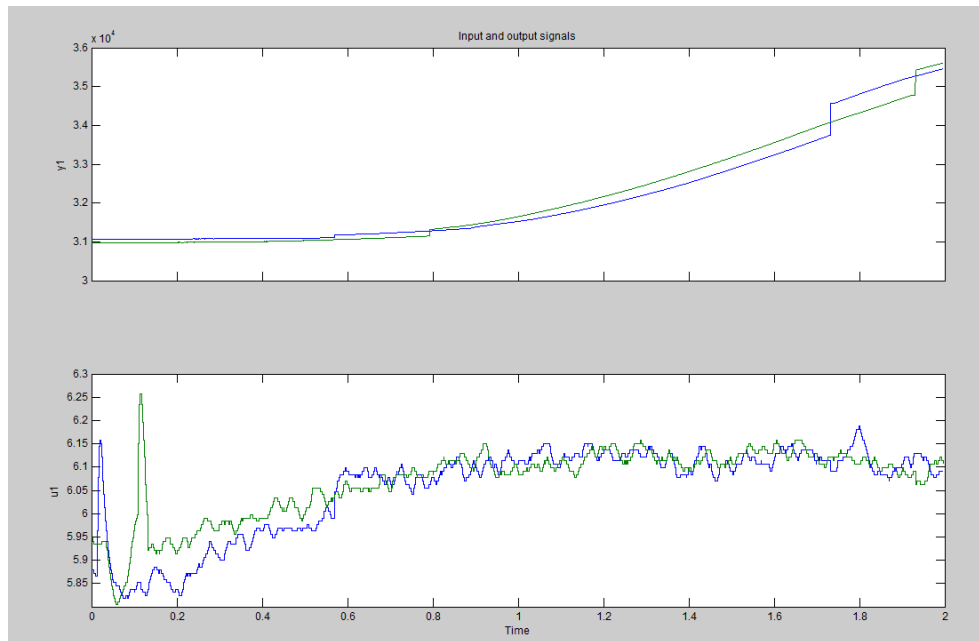


Figura 49: Gráficas mostrando la comparativa entre dos ensayos en fase de calentamiento.

Una vez se han introducido los valores correspondientes a la fase a analizar se procede a la creación del modelo. Para ello se buscará una función de transferencia con el menor número de polos y zeros con el fin de evitar inestabilidades.

La respuesta del modelo respecto a los valores introducidos como entrada y salida se representará en forma de gráfica mostrando la función resultante sobre la salida del sistema, acompañándose también de un porcentaje que dependerá del grado de aproximación del mismo a la salida del sistema original: cuanto más alto, más fidedigno será, y por tanto mejor respuesta se obtendrá.

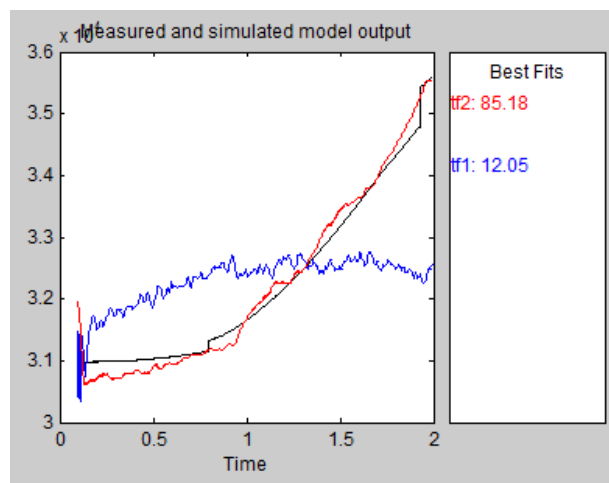


Figura 50: Gráfica comparando las aproximaciones entre dos modelos.

En la fotografía se muestra la comparativa entre dos modelos; en ambos se ha usado una función de transferencia discreta dado que todo el sensado hasta el momento se ha realizado de esta forma. Escogiéndose así por tanto el modelo con mayor índice de aproximación para, posteriormente comprobar su resultado en el Host con las medidas en tiempo real. Siendo su función de transferencia la abajo mostrada.

$$\frac{-328.2 z^{-1} + 328.2 z^{-2}}{1 - 0.9951 z^{-1} - 0.9818 z^{-2} + 0.9768 z^{-3}}$$

Como ya se ha señalado, esta función de transferencia será multiplicada por la entrada del sistema, es decir, la impedancia y se comparará con la salida del mismo, que es la posición, para comprobar si efectivamente hay una cierta analogía. Para ello, habrá que dirigirse nuevamente al Host ya que es ahí donde se observa e interactúa en tiempo real con las medidas, bastando simplemente con unir el bloque de la impedancia al de la función de transferencia y compararlo con el de la posición.

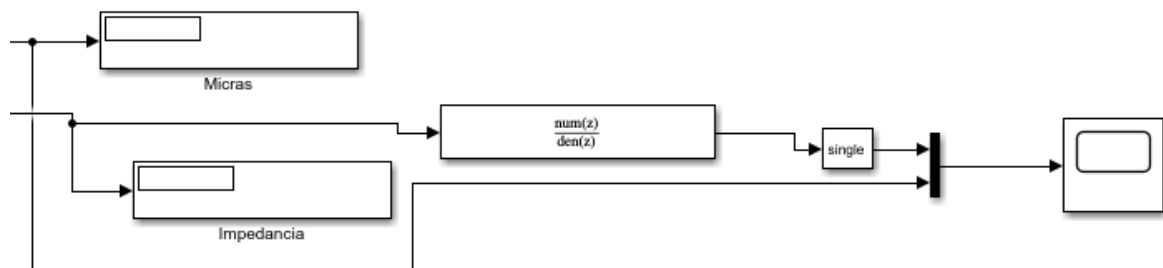


Figura 51: Diagrama de bloques usado para la visualización de la respuesta del modelo.

Por desgracia, como se puede observar a continuación, el resultado obtenido no es el deseado, ya que, si bien es cierto que en determinadas ocasiones la señal de salida puede acercarse mínimamente a lo esperado en el espectro de medición elegido, en otras ocasiones no guarda ningún tipo de relación con la función de salida.

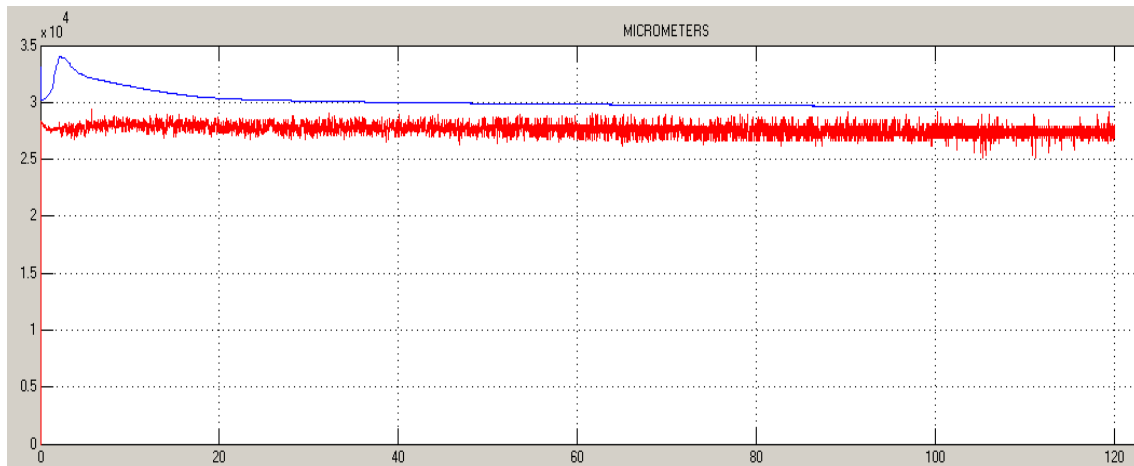


Figura 52: Gráfica mostrando respuesta fallida al modelo creado 1.

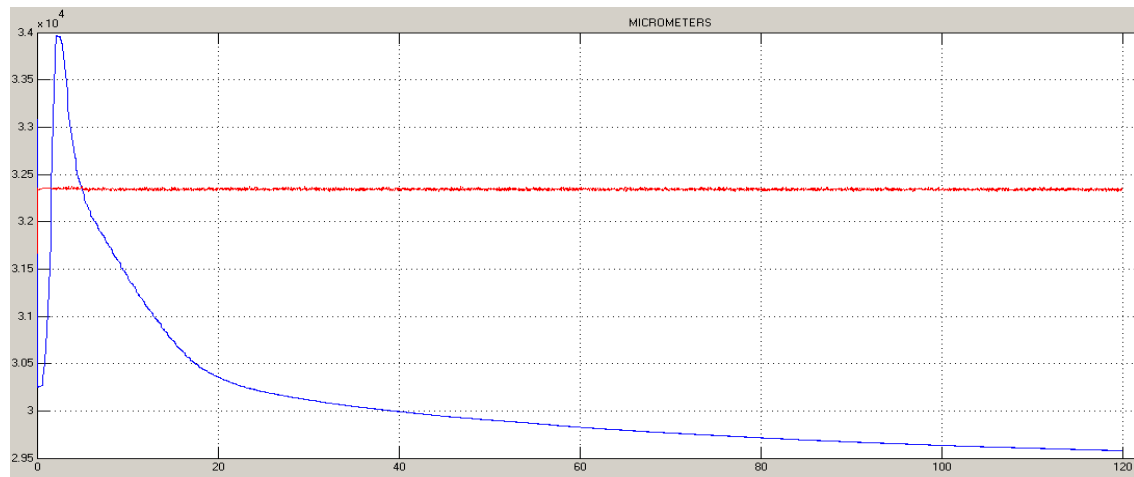


Figura 53: Gráfica mostrando respuesta fallida al modelo creado 2.

Tras revisar todo el procedimiento y ante la imposibilidad de asegurar un correcto funcionamiento del modelo en el 100% de los ensayos, se debe optar por cambiar de método para hallar la forma de encontrar una respuesta que permita relacionar la impedancia con la posición.

5.1.3 Estimación mediante promediado de puntos.

Tras comprobar que, aun teniendo un modelo que a primera vista tenía un índice de aproximación óptimo y que en la simulación inicial se adaptaba a la señal de salida, no respondía como debía, se hace necesario emprender un análisis más exhaustivo. Por ello, se decide trabajar únicamente con los datos originales, es decir, las gráficas de las señales de la impedancia y la posición, buscando poder encontrar así de forma "manual" una relación entre ambas señales.

Para ello, se procederá a analizar las decenas de ensayos realizados promediando los datos, intentando establecer de esta forma un valor único de la impedancia para un valor o rango de valores acotado de la posición.

Desde el inicio, el sensor ha estado muestreando cada 1 milisegundo para poder obtener una mayor precisión en la lectura y tratado de los datos, pero dado que ahora este análisis se va a realizar de una forma manual, se precisa de un tiempo de muestreo en el que se aprecien cambios significativos con más celeridad. Por ello, se ha decidido muestrear cada 125 milisegundos.

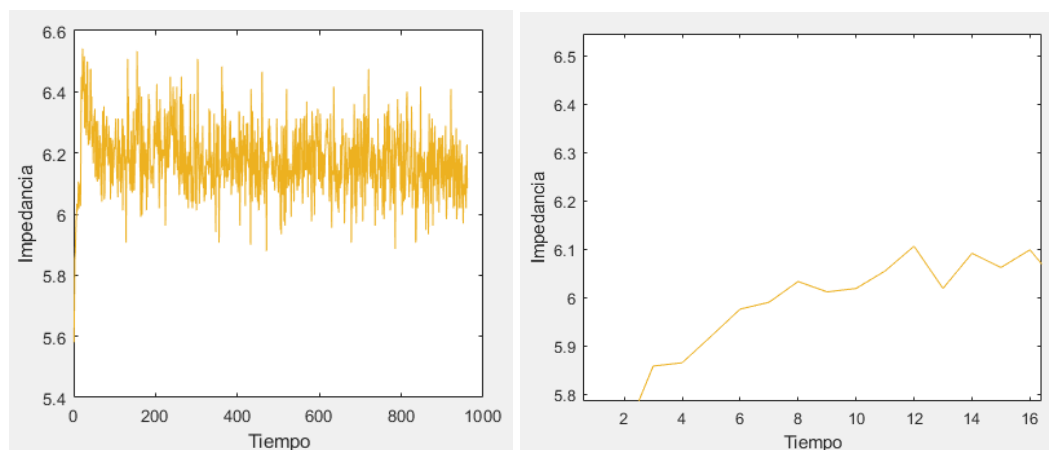


Figura 54: Muestreado a 125 milisegundos de ensayo completo y fase de calentamiento en la impedancia.

En las fotografías se puede observar la fase de calentamiento de un ensayo cualquiera muestreado a 125 milisegundos, mostrándose a la izquierda ambas fases del proceso y a la derecha únicamente la correspondiente al calentamiento. Como se puede apreciar en esta última, solamente hay 16 valores o puntos referidos a los 2 segundos que dura esta etapa (ya que $16 * 0.125$ segundos = 2 segundos) lo cual simplificará considerablemente el análisis a la hora de ir anotando a que punto de la impedancia corresponde para ese tiempo en la gráfica de la posición.

Este mismo muestreo se realizará también con la señal de posición.

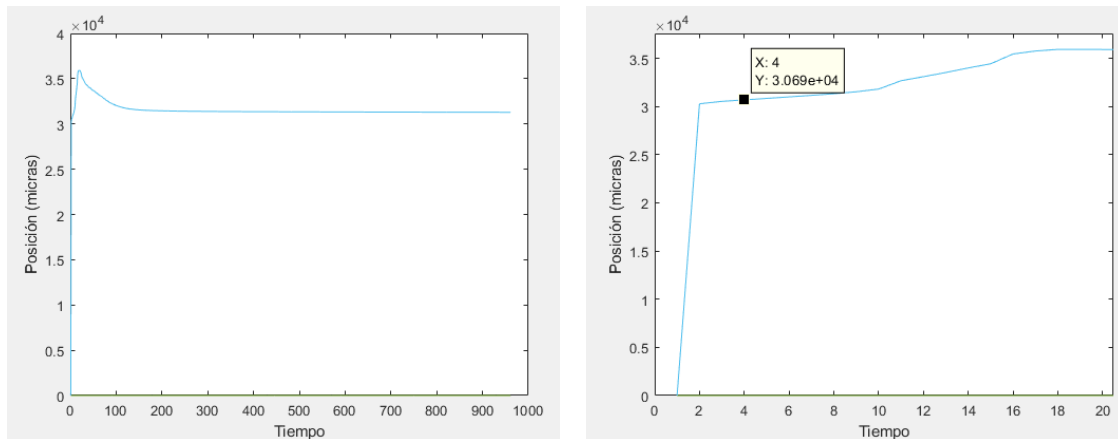


Figura 55: Muestreado a 125 milisegundos de ensayo completo y fase de calentamiento en la posición.

Al igual que en el caso de la impedancia, a la izquierda se encuentra una fotografía de la señal de la posición mostrando un ensayo completo muestreado a 125 milisegundos y a la derecha una de la fase de calentamiento.

Tras realizar todos los ensayos y efectuar su correspondiente anotación se comprueba que no hay una manera concluyente de relacionar un valor único de impedancia con un valor único de posición, debido principalmente a la gran disparidad que presentan los datos para cada una de las zonas, sirva de ejemplo la figura abajo mostrada:

	3	4	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Impedancia 1	6,048	6,041	6,11	6,144	6,187	6,223	6,222	6,223	6,223	6,223	6,209	6,189
Posición 1	3,101	3,102	3,114	3,182	3,219	3,242	3,281	3,326	3,391	3,499	3,546	3,572
Impedancia 2	5,752	5,762	5,821	5,896	5,917	5,934	5,938	5,941	5,954	5,966	5,953	5,959
Posición 2	3,134	3,135	3,138	3,151	3,185	3,226	3,256	3,292	3,352	3,37	3,44	3,514
Impedancia 3	5,858	5,862	5,948	6,012	6,014	6,015	6,045	6,081	6,067	6,055	6,062	6,081
Posición 3	3,054	3,069	3,1	3,133	3,156	3,181	3,263	3,31	3,364	3,401	3,477	3,546
Impedancia 4	5,795	5,856	5,948	6,012	6,095	6,088	6,077	6,059	6,061	6,062	6,055	6,041
Posición 4	3,126	3,128	3,136	3,181	3,205	3,239	3,284	3,31	3,358	3,398	3,487	3,542
Impedancia 5	5,531	5,553	5,665	5,665	5,721	5,752	5,761	5,765	5,763	5,762	5,758	5,739
Posición 5	3,055	3,072	3,106	3,136	3,158	3,177	3,246	3,303	3,345	3,392	3,441	3,482
Impedancia 6	5,81	5,874	5,914	5,989	5,994	6,001	6,012	6,021	6,025	6,029	6,036	6,046
Posición 6	3,19	3,194	3,195	3,213	3,218	3,235	3,259	3,278	3,297	3,336	3,375	3,423
Impedancia 7	5,785	5,848	5,922	5,98	6,005	6,017	6,031	6,045	6,033	6,02	6,03	6,032
Posición 7	3,202	3,204	3,207	3,219	3,224	3,239	3,274	3,325	3,367	3,38	3,426	3,456

Figura 56: Comparación de 7 ensayos entre zonas de posición y promedio de impedancias en la fase de calentamiento.

En esta ilustración perteneciente a 7 ensayos cualesquiera se puede comprobar que no hay una correlación entre los datos para una misma zona, ya que por ejemplo en el primer ensayo para una posición de 32.000 micras le corresponde una impedancia de 6,223 ohmnios, y en cambio en el quinto ensayo para esa misma posición registra una impedancia de 5,761 ohmnios.

Este hecho probablemente sea debido a la histéresis a la que se hacía referencia en el segundo capítulo, surgida durante la transformación del material de martensita en austenita.

Por lo tanto, no se ha podido establecer una relación única para cada valor, pero tras promediar todos los datos se intentará establecer una relación por zonas, es decir, conociendo una determinada impedancia podría saberse aproximadamente entre que valores de posición se encontraría, resultando así por tanto la siguiente relación:

```
2 - x=[5.70 5.802 5.84 5.86 5.92 5.98 6.03 6.05 6.04 6.03];
3 - y=[3.07 3.105 3.13 3.16 3.19 3.22 3.25 3.30 3.40 3.50];
4 - plot(x,y);
5 - Impedancia="Impedancia";
6 - Posicion="Posicion";
7 - xlabel(Impedancia);
8 - ylabel(Posicion);
```

Figura 57: Código perteneciente a la introducción de datos en Matlab para su posterior graficado.

Una vez creado un registro en el que se asocia cada valor de la impedancia promediado a una etapa se grafica. Es importante recordar que cada uno de esos valores de la impedancia no se corresponden con un valor único de posición, sino que se aproxima a dicho valor, pudiendo ser más o menos.

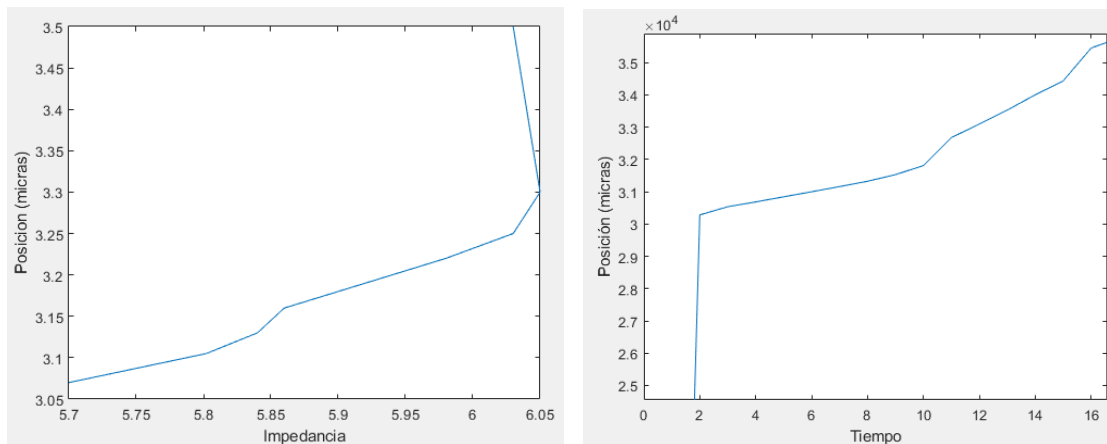


Figura 58: Comparación entre gráfica obtenida por el método del promediado de puntos y una de posición cualquiera en fase de calentamiento.

Como se puede observar en la comparativa de ambas gráficas, no hay una correlación entre los datos de posición originales y los datos habiendo hecho el promediado por etapas, evidenciándose por tanto la imposibilidad de obtener unos resultados concluyentes que permitan establecer una relación entre la posición y la impedancia.

5.2. Enfriamiento.

El hecho de no haber podido obtener ningún resultado concluyente en la fase de calentamiento no es una buena premisa de cara a esta etapa, sobre todo teniendo en cuenta que este periodo está caracterizado por tener mucho ruido en la señal. En esta fase de enfriamiento se usará únicamente el método de estimación mediante promediado de puntos.

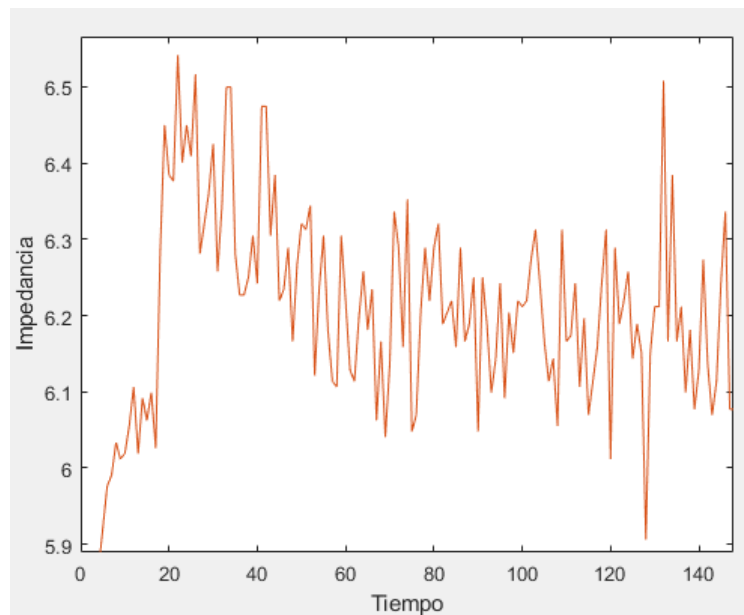


Figura 59: Gráfica mostrando tanto la fase de calentamiento como la de enfriamiento.

Tal y como se puede observar en esta captura realizada a un ensayo muestreado a 125 milisegundos, que contiene tanto la fase de calentamiento, como el inicio y buena parte de la de enfriamiento se pueden apreciar dos hechos:

- El primero, y referido a lo que se acaba de comentar justo antes, es la gran cantidad de ruido que posee la fase de enfriamiento comparándola con la fase de calentamiento, por lo que ante esta tesitura se hace necesario aplicar un filtro que se explicará más adelante.
- El segundo hecho está relacionado con la histéresis que posee el material de SMA al transformar su estado de martensita en austenita en la fase de calentamiento. Como se puede evidenciar, a pesar de que el periodo de calentamiento únicamente dura 2 segundos (16 en la gráfica), se puede comprobar que la impedancia sigue aumentando pasada esta frontera, debido a que el sistema sigue conservando sus propiedades aún habiendo finalizado el estímulo que las generaba.

Como ya se ha mencionado, para poder realizar un análisis lo más aproximado posible se diseñará un filtro, en concreto el *average filter*, en el cual se va realizando un promedio en función de la ventana de datos que se desee, es decir, a ventanas grandes,

mayor filtrado y por el contrario a ventanas pequeñas menos puntos se filtrarán y por lo tanto más ruido poseerá la señal

```
3 %%Impedancia
4 - filame='Ensayo_1500g_rate_4.mat';
5 - folder='C:\Users\David\Desktop\TFG\';
6 - filename_full=sprintf("%s%s",folder,filame);
7 - load (filename_full);
8 - aux_value=Impedancia2.signals.values(:,3);
9 - aux_val_2=Impedancia2.signals.values(:,3);
10 - windowsSize=5;
11 - a=1;
12 - b=(1/windowsSize)*ones(1,windowsSize);
13 - plot(filter(b,a,aux_val_2))
14 - hold on;
15 - plot(aux_value)
16 - medida2="Tiempo";
17 - medida="Impedancia";
18 - xlabel(medida2);
19 - ylabel(medida);
```

Figura 60: Código utilizado para la creación del average filter.

Primeramente, se le debe dar el nombre del archivo matlab a buscar, así como la carpeta en la que se encuentra alojado para posteriormente, utilizando el comando “WindowsSize”, como ya se ha señalado previamente escoger el tamaño de la ventana de datos a analizar. El resto de sentencias son simplemente sintaxis del programa para poder utilizar este comando, así como darle un nombre a los ejes.

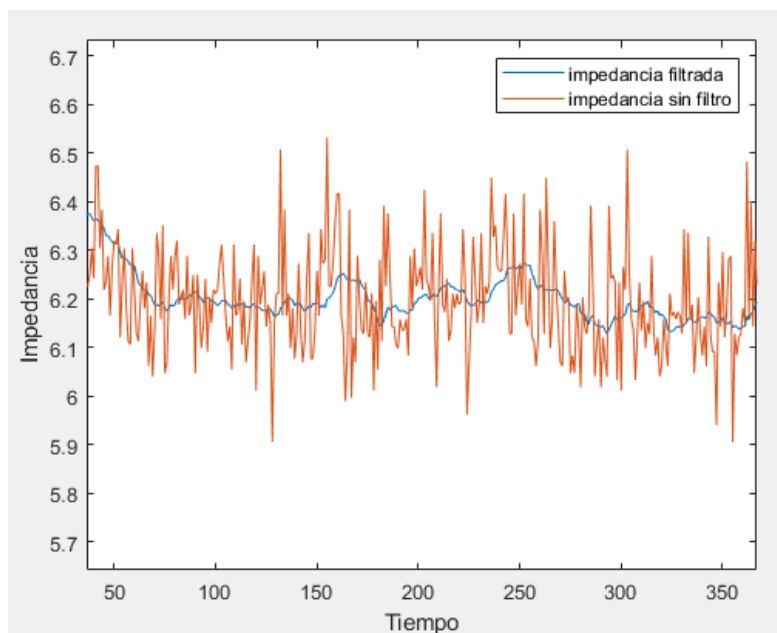


Figura 61: Gráfica mostrando el filtrado del ruido.

Observando la gráfica es palpable el efecto del filtro, siendo ahora notoriamente más sencillo el análisis de datos. Por su parte, la señal de la posición no hará falta que sea filtrada ya que presenta mucho menos ruido tal y como se puede ver a continuación.

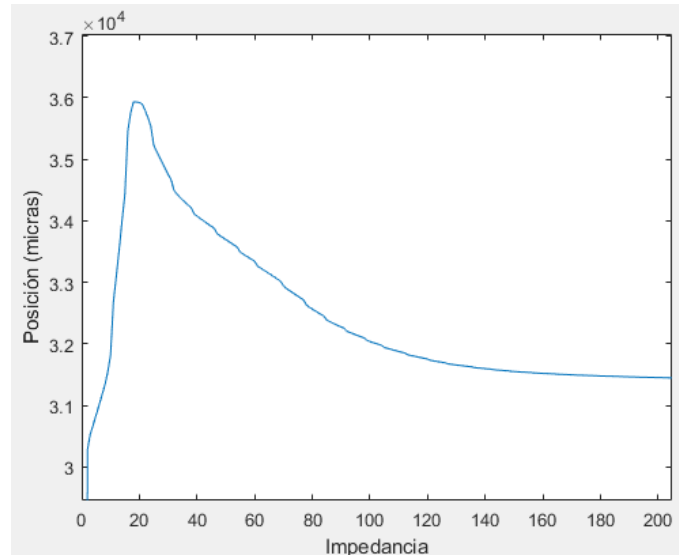


Figura 62: Gráfica perteneciente a un ensayo casi completo de la señal de posición.

Aunque si bien es cierto que no presenta prácticamente ruido sigue siendo palpable la histéresis mencionada anteriormente, ya que si se observa con atención se comprueba que nuevamente, tras rebasar la frontera de la etapa de calentamiento (16 en la gráfica), la señal sigue aumentando a pesar de no contar ya con un suministro energético relevante (se recuerda que durante la etapa de enfriamiento se aplica corriente durante intervalos muy breves).

Tras haber analizado todos los ensayos correspondientes, se comprueba que nuevamente y como era de suponer, es imposible establecer una relación única entre la impedancia y la posición para este periodo.

	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
Impedancia 32	6,098	6,199	6,308	6,412	6,42	6,417	6,394	6,358	6,37	6,362	6,333	6,29
Posición 32	3,593	3,592	3,58	3,553	3,513	3,494	3,475	3,449	3,439	3,429	3,421	3,408
Impedancia 33	6,099	6,178	6,275	6,357	6,383	6,363	6,348	6,317	6,343	6,348	6,324	6,341
Posición 33	3,593	3,592	3,575	3,549	3,509	3,491	3,472	3,446	3,435	3,426	3,418	3,404
Impedancia 34	5,748	5,863	5,997	6,126	6,22	6,162	6,178	6,169	6,169	6,115	6,163	6,132
Posición 34	3,552	3,568	3,549	3,525	3,49	3,474	3,458	3,443	3,424	3,415	3,407	3,399
Impedancia 35	6,051	6,14	6,16	6,055	6,011	5,99	5,98	5,97	5,96	5,93	5,89	5,905
Posición 35	3,44	3,43	3,436	3,437	3,436	3,433	3,431	3,42	3,419	3,418	3,415	3,413
Impedancia 36	6,108	6,131	6,079	6,043	6,039	6,03	5,995	5,925	5,94	5,93	5,913	5,906
Posición 36	3,463	3,462	3,462	3,461	3,458	3,454	3,449	3,446	3,443	3,44	3,438	3,433
Impedancia 37	6,06	6,14	6,16	6,096	6,058	6,056	6,05	6,014	5,946	5,941	5,94	5,945
Posición 37	3,464	3,463	3,462	3,461	3,459	3,455	3,449	3,446	3,443	3,44	3,435	3,432

Figura 63: Comparación entre zonas de posición y promedio de impedancias para la fase de enfriamiento.

En esta tabla perteneciente a otros 7 ensayos cualesquiera se evidencia que vuelve a no haber una correlación entre las dos señales. Valga por ejemplo el ensayo 35 que para una posición de 34.380 micras posee una impedancia propia de 5,89 ohmnios, y comparándolo con el ensayo 32 para esa misma posición resulta una impedancia de 6,324 ohmnios.

Ingresando los datos en matlab al igual que se hizo anteriormente con la fase de calentamiento:

```
2 - x=[6.17 6.10 6.18 6.05 6.04 6.04 6.10 5.93 5.93 5.97 6.11 6.14 6.10];
3 - y=[3.60 3.55 3.50 3.45 3.40 3.35 3.30 3.28 3.25 3.22 3.2 3.18 3.15];
4 - plot(x,y);
5 - Impedancia="Impedancia";
6 - Posicion="Posicion (micras)";
7 - xlabel(Impedancia);
8 - ylabel(Posicion);
```

Figura 64: Código perteneciente a la introducción de datos para su posterior graficado en fase de enfriamiento.

Una vez introducidos se grafica, obteniéndose:

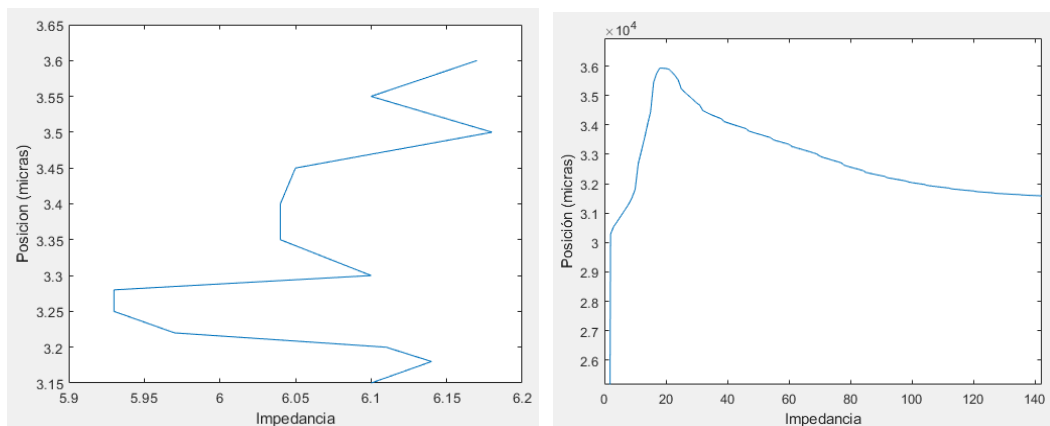


Figura 65: Comparación entre gráfica obtenida mediante promediado de puntos y una de posición cualquiera en fase de enfriamiento.

Como se puede apreciar a simple vista, ambas gráficas no guardan ningún tipo de relación, esto se debe a que la impedancia en este periodo lejos de describir una función lineal, oscila constantemente, tal y como se puede ver en la figura 61.

Por tanto, es también imposible establecer una relación entre la posición y la impedancia que permita eliminar el detector de movimiento para la fase de enfriamiento.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1. Conclusiones.

Los materiales SMA son un tipo de tecnología caracterizado por unas propiedades muy peculiares: la superelasticidad, el efecto memoria y el doble efecto memoria. Estas propiedades consisten a grandes rasgos en poseer la capacidad de deformarse repetidamente (en torno hasta a un 8%) y retornar a su origen una vez la carga es liberada (superelasticidad) o aun habiendo plastificado recuperar su forma original aplicándole calor (efecto memoria y doble efecto memoria), confiriéndoles así por tanto una serie de ventajas respecto a otro tipo de materiales al disponer de esta forma de multitud de aplicaciones en diversos ámbitos, como son la ingeniería o la biomedicina principalmente.

Aunque, si bien es cierto que poseen unas propiedades particulares, es precisamente la naturaleza de estas propiedades las que lo condicionan para diferentes situaciones. Ya que, en concreto la explicación a la propiedad sobre la que trata todo este proyecto, es decir, el efecto memoria, se debe a una transformación de sus componentes microestructurales: primeramente, de martensita a austenita en caso de encontrarse en una fase de calentamiento y posteriormente, de austenita a martensita en caso de que se trate de un periodo de enfriamiento.

Estas transformaciones de estado llevan asociadas un elemento característico de los sistemas no lineales: la histéresis, es decir, el fenómeno mediante el cual un material conserva alguna de sus propiedades en ausencia del estímulo que lo genera.

A lo largo de todo el proyecto se ha hecho palpable la presencia de este carácter no lineal a través de la ya mencionada histéresis, tanto en la señal de la impedancia, como en la señal de la posición, dificultando en gran medida el objetivo de este proyecto, que era poder establecer una relación entre ambas variables tanto en la fase de calentamiento del material como en la de enfriamiento, que permitiese eliminar el detector de posición utilizado inicialmente.

De esta forma, y tras haberlo intentado mediante dos métodos diferentes (modelado a través del *Toolbox system identification* y estimación mediante promediado de puntos), ha resultado imposible poder establecer una relación precisa entre la impedancia y la posición, por lo que la principal conclusión que se puede sacar después de realizar este proyecto es que con los medios de los que se ha dispuesto no es posible poder establecer dicha relación, precisándose por tanto de otros para poder lograrlo.

6.2. Trabajos futuros.

Como ya se ha mencionado, con los medios de los que se ha dispuesto ha resultado imposible establecer una mínima relación entre la impedancia y la posición que

permitiese eliminar el detector de posición, por lo que de cara a futuros trabajos se abren dos posibles vías:

Por un lado, o bien se opta por volver a intentar establecer esta relación, pero con otro tipo de medios, es decir, sensores más precisos y otra clase de programas, o bien se opta por buscar la manera de mejorar la incorporación del sensor de posición a los prototipos de trajes en los que se utilizan, ya que es preciso recordar que actualmente todos estos tipos de trajes o mallas basados en la tecnología SMA incluyen en el mismo un sensor de posición, por lo que el objetivo sería optimizar este factor.

7. PRESUPUESTO Y ENTORNO SOCIOECONÓMICO

A continuación, se presentará una elaboración de lo que se consideraría el presupuesto estimado para este proyecto, así como un pequeño análisis del impacto socioeconómico del mismo.

7.1 Presupuesto

En primer lugar, se describirán los elementos del presupuesto, para después presentar la estimación detallada del mismo, teniendo por tanto:

- Elemento: Se especifica el nombre de cada uno de los bienes.
- Tipo de recurso: Se especifica de qué tipo de recurso se trata.
- Unidad: Variarán en función del tipo de recurso que se trate.
- Cantidad: Es el número de unidades que se han precisado para realizar el proyecto.
- Coste: Es el precio de las unidades.
- Total: Es el cómputo parcial de lo que ha costado cada recurso.

Elemento	Tipo de recurso	Unidad	Cantidad	Coste	Total
Estudiante	Humano	€/día	154	30	4620
Lic. Matlab	Prop. Intelectual	€/mes	7	80	560
Lic. Windows	Prop. Intelectual	€/mes	7	30	210
Ordenador	Bien material	€	1	750	750
Tarjeta STM32F4	Bien material	€	1	16,50	16,50
Etapas de potencia	Bien material	€	1	26,82	26,82
Cables	Bien material	€	1	20	20
Sensor posición	Bien material	€	1	39,42	39,42
Sensor corriente	Bien material	€	1	32,54	32,54
Hilo SMA	Bien material	€	1	13,2	13,2
Fte. alimentación	Bien material	€	1	139	139
Juego de pesas	Bien material	€	1	15	15
Imán multipolar	Bien material	€	1	4,95	4,95
					6.447,43

TABLA 1: DESGLOSE DEL PRESUPUESTO ESTIMADO.

Como se puede observar, el coste de la licencia del programa Matlab es notoriamente superior a la de Microsoft Windows al tratarse de un software empleado principalmente en el ámbito ingenieril.

Por otro lado, la estimación de los recursos humanos se ha realizado de una manera que se aproximara lo máximo posible a la realidad, esto es un trabajo de media jornada remunerado con 600€/mes, que dividido entre unos 20 días laborables de los que consta un mes resultan 30€/día.

7.2. Entorno socioeconómico

Al no haberse podido obtener una serie de resultados concluyentes que permitiesen establecer una relación clara y constante entre la posición y la impedancia, no se puede eliminar la parte correspondiente al detector de posición, siendo por tanto en la práctica nulo el impacto ocasionado. Por ello, este apartado se analizará en caso de que en futuros proyectos se consiguiese establecer dicha relación eliminando así el detector de posición.

Por un lado, uno de los efectos más inmediatos sería el económico, ya que se podría prescindir de uno de los elementos utilizados durante este proyecto, ahorrándose por tanto el coste que ello supone. Aunque tal y como se puede observar en el gráfico del presupuesto, este ahorro no sería excesivamente cuantitativo, ya que simplemente se deduciría del gasto el precio del sensor y del cableado que precisa, lo cual rondaría los 40€. Además, supondría un beneficio en el ámbito ambiental, dado que al usar menos elementos también se estaría contaminando menos, aunque tampoco es que contribuya de una forma determinante dado que se seguiría necesitando del resto de elementos, así como del gasto energético que ello conlleva.

Por otro lado, donde quizá más impacto tuviese sería en el aspecto social, ya que el hecho de poder quitar la parte del sensado de posición permitiría al sujeto de pruebas o paciente una mayor comodidad a la hora de usar la malla con el hilo SMA.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Instituto Nacional para la seguridad e higiene en el trabajo. [En línea] [Citado el: 12 de agosto de 2018.]. Disponible en: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/GuiasTécnicas/Ficheros/g_electr.pdf.
- [2] A. Jiménez Morales. Apuntes asignatura *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. 2014.
- [3] S. Herranz Moreiro, “Control de posición de un material con memoria de forma”, Trabajo de fin de grado, Departamento de Electrónica y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2011.
- [4] D. Schauer, D. Hutchison y M. Lemma. “An historical perspective”, *nitinol.com*, 14-05-2010. [En línea]. Disponible en: <https://nitinol.com/reference/a-historical-perspective/>
- [5] S. de la flor. *Aleaciones con memoria de forma*, 2005.
- [6] W.F. Smith. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 4th ed. McGraw-Hill. 2006.
- [7] L. Moreno, S. Garrido, D. Blanco y M.L. Muñoz. *Materiales inteligentes: aleaciones con memoria de forma (SMA)*. 2009.
- [8] R. Cordes Sánchez. “Metales, aleaciones especiales y biomateriales”. *cordes.com*, 2007. [En línea]. Disponible en: https://www.cordes.com.ar/index.php?modulo=f_mater&accion=sitio_ver&idf_mater=24
- [9] R. Lahoz y J.A. Puértolas. *Entrenamiento y memoria de forma de doble camino en aleaciones niti*. Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos. Centro Politécnico Superior – I.C.M.A. Universidad de Zaragoza, España. 2002.
- [10] A. Gómez López. *Nitinol, un biomaterial con memoria de forma*. Departamento de Ingeniería de Materiales. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, México. 2011.